

**Wuppertal Institut**  
für Klima, Umwelt, Energie  
GmbH

## **Potenzialscreening zur Vorbereitung des Klimaschutzplanes NRW**

**Bericht**

Sascha Samadi  
Christoph Zeiss  
Benjamin Best  
Valentin Espert  
Ulrich Jansen

Wuppertal, 13. November 2012

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung .....</b>	<b>4</b>
<b>2. Methodendarstellung.....</b>	<b>5</b>
<b>3. Betrachtete Studien mit Angaben zu Emissionsminderungspotenzialen .....</b>	<b>6</b>
3.1. Sektorübergreifende Studien .....	6
3.2. Sektor-spezifische Studien .....	9
3.2.1. Studien speziell zum Sektor „Umwandlung“ .....	9
3.2.2. Studien speziell zum Sektor „Produzierendes Gewerbe/Industrie“ .....	12
3.2.3. Studie speziell zum Sektor „Bauen/Wohnen und GHD“ .....	12
3.2.4. Studien speziell zum Sektor „Verkehr“ .....	13
3.2.5. Studie speziell zum Sektor „Landwirtschaft, Forst, Boden“ .....	15
3.2.6. Studie speziell zum Sektor „Private Haushalte“ .....	15
<b>4. Sektorale Potenziale.....</b>	<b>16</b>
4.1. Umwandlungssektor.....	16
4.1.1. Einleitung .....	16
4.1.2. Erhöhung der Wirkungsgrade fossiler Kraftwerke durch Kraftwerksertüchtigung oder -neubau mit gleichem Brennstoff.....	16
4.1.3. Verringerung des Braun- und Steinkohleanteils im fossilen Energieträgermix.....	18
4.1.4. Effizientere Nutzung fossiler Energieträger durch Erhöhung des KWK-Anteils ....	20
4.1.5. Einsatz von Carbon Capture & Storage (CCS) bzw. Carbon Capture & Use (CCU)-Technologien .....	22
4.1.6. Verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien für die Strom- und Wärmeerzeugung	24
4.1.7. Minderungen des Strom- und Wärmebedarfs beim Endverbrauch .....	27
4.2. Produzierendes Gewerbe/Industrie .....	28
4.2.1. Einleitung .....	28
4.2.2. Reduktion des Endenergiebedarfs nach Industriebranchen .....	28
4.2.3. Energieträgerwechsel hin zu Energieträgern mit geringerem CO <sub>2</sub> -Ausstoß.....	35
4.2.4. Prozessänderungen und CCS-/CCU-Einsatz zur Reduktion der prozessbedingten Emissionen.....	36
4.2.5. Änderungen der Nachfrage nach Zwischen- und Endprodukten .....	40
4.3. Bauen, GHD .....	42
4.3.1. Einleitung .....	42
4.3.2. Verbesserung der Gebäudeenergieeffizienz bestehender sowie neuer Gebäude.....	42
4.3.3. Verbesserung der Energieeffizienz von Heizungen, Anlagen, Geräten und Maschinen.....	44
4.3.4. Verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärmeerzeugung vor Ort.....	46
4.3.5. Verringerung bzw. Veränderung der Nachfrage nach Wohnraum und nach GHD-Leistungen.....	51
4.4. Verkehr .....	52
4.4.1. Einleitung .....	52
4.4.2. Technische Effizienzsteigerung, Erhöhung der Auslastung und Energieträgerwechsel im Personenverkehr.....	52
4.4.3. Technische Effizienzsteigerung, Erhöhung der Auslastung und Energieträgerwechsel im Wirtschafts- und Güterverkehr .....	54
4.4.4. Verkehrsverlagerung und -vermeidung .....	56
4.5. Landwirtschaft, Forst, Boden .....	60

4.6.	Private Haushalte .....	62
4.6.1.	<i>Einleitung</i> .....	62
4.6.2.	<i>Erhöhung der Effizienz der verwendeten Geräte</i> .....	63
4.6.3.	<i>Verhaltensänderungen bzw. Änderungen der Konsummuster</i> .....	65
<b>5.</b>	<b>Lücken in der Potenzialdarstellung .....</b>	<b>68</b>
5.1.	Umwandlungssektor .....	69
5.2.	Industrie .....	69
5.3.	Bauen und Wohnen/GHD .....	72
5.4.	Verkehr .....	72
5.5.	Landwirtschaft.....	73
5.6.	Private Haushalte .....	73
<b>6.</b>	<b>Umgang mit Ressourceneffizienz und Ressourcenschutz.....</b>	<b>74</b>
<b>7.</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>75</b>

# 1. Einleitung

Die alte Landesregierung von Nordrhein-Westfalen hatte sich in ihrem Koalitionsvertrag (NRW-SPD und Bündnis 90 / Die Grünen NRW 2010) zum Ziel gesetzt, einen Klimaschutzplan zu entwickeln, der die notwendigen Klimaschutzmaßnahmen zur Erreichung der Klimaschutzziele, inklusive von Zwischenzielen, konkret benennt. Er sollte erstmals im Jahr 2012 erstellt und danach alle fünf Jahre fortgeschrieben werden. Die Eckpunkte des Klimaschutzplanes wurden im Entwurf des Klimaschutzgesetzes (Landesregierung NRW 2011) beschrieben.

Das Wuppertal Institut hat im Auftrag des Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz (MKULNV) NRW unter Mitarbeit der Beteiligungsagentur IFOK ein Partizipationskonzept erstellt, in dem ein Fahrplan zur Erstellung eines Klimaschutzplanes unter Mitwirkung der betroffenen Akteure in NRW enthalten ist. Die Vorstellung des Partizipationskonzeptes erfolgte auf einer Auftaktveranstaltung am 15. Februar 2012 in Düsseldorf (Richwien und Fishedick 2012).

Grundlage der inhaltlichen Bearbeitung des Klimaschutzplanes ist eine szenariogestützte Auswahl notwendiger Klimaschutzstrategien und Klimaschutzmaßnahmen für NRW, durch welche die Klimaschutzziele der Landesregierung erreicht werden können. Für die Modellerstellung und die Diskussion von Klimaschutzmaßnahmen in den sektoralen Arbeitsgruppen zur Erstellung des Klimaschutzplanes sind umfangreiche Vorarbeiten notwendig. Dazu gehört zentral eine Übersicht über die Emissionsminderungs- und Energieeffizienzpotenziale der einzelnen Sektoren in NRW. Dies ist auch explizit im Entwurf des Klimaschutzgesetzes unter § 6 Absatz 4 Satz 3 gefordert. Aufgrund der kurzen Vorbereitungszeit zur Erstellung des Klimaschutzplanes ist es nicht möglich, eine eigene umfassende Potenzialuntersuchung für ganz Nordrhein-Westfalen durchzuführen. Deswegen wird im ersten Schritt ein Literaturscreening durchgeführt, in dem dargestellt wird, welche Potenzialuntersuchungen es für NRW in den einzelnen Sektoren gibt. Wo es keine expliziten Untersuchungen für den Raum Nordrhein-Westfalen gibt werden nationale Quellen herangezogen.

Aus der Literaturübersicht werden die wichtigsten sektoralen Treibhausgasminderungs- und Effizienzpotenziale herausgezogen und so aufbereitet, dass sie im THG-Modell und als Vorlage für die sektoralen Arbeitsgruppen dienen können.

Dabei ist zu erwarten, dass es in bestimmten Bereichen keine aussagekräftigen Potenzialuntersuchungen und damit keine nutzbaren Daten gibt. Diese Bereiche werden am

Schluss der Untersuchung benannt und es erfolgt eine Abschätzung, ob entsprechende Potenzialuntersuchungen im Laufe des Partizipationsprozesses erarbeitet werden können.

## 2. Methodendarstellung

Für jeden der Sektoren wurde eine ausführliche Literaturrecherche durchgeführt, die darauf abzielte, aktuelle wissenschaftliche Untersuchungen zu identifizieren, die sich mit Art, Umfang und/oder zeitlicher Realisierungsmöglichkeit von THG-Minderungspotenzialen auseinandersetzen. Ein Schwerpunkt war dabei die Suche nach Literatur mit Bezug zu vorhandenen Potenzialen in NRW. Wie Kapitel 4 für die einzelnen Sektoren zeigen wird, konnten allerdings nur wenige speziell auf NRW Bezug nehmende Potenzialstudien identifiziert werden.<sup>1</sup>

Dabei wurde zwischen sechs verschiedenen Sektoren unterschieden, in Übereinstimmung mit der bereits mit dem Auftraggeber abgestimmten Struktur der Arbeitsgruppen:

- Umwandlungssektor
- Produzierendes Gewerbe/Industrie
- Bauen und Wohnen/GHD
- Verkehr
- Landwirtschaft/Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft
- Private Haushalte

In einem nächsten Schritt wurden die identifizierten Potenzialstudien in Bezug auf die Frage ausgewertet, inwiefern sie jeweils systematische und quantifizierbare Rückschlüsse auf vorhandene Potenziale leisten können. Zahlreiche Studien, die lediglich Fallbeispiele von THG-Minderungsmaßnahmen beschreiben, ohne Rückschlüsse auf die durch die beschriebenen Maßnahmen *insgesamt* erzielbaren THG-Minderungen zu erlauben, wurden in der vorliegenden Arbeit nicht näher beschrieben. Die verbliebenen Studien wurden systematisch ausgewertet und die vorhandenen Aussagen zu Minde-

---

<sup>1</sup> Bei der Verwendung des Begriffs "Potenzial" an dieser Stelle wie auch im gesamten vorliegenden Bericht ist zu beachten, dass es sich bei den zitierten Potenzialangaben jeweils nicht um das technisch prinzipiell (maximal) erreichbare Potenzial zur THG-Minderung bzw. Energieeinsparung handelt, sondern um das in den verschiedenen Studien – auch unter Gesichtspunkten der Wirtschaftlichkeit – als realisierbar angesehene Potenzial.

rungspotenzialen wurden so weit wie möglich miteinander verglichen und diskutiert. Die wichtigsten verwendeten Potenzialstudien werden in Kapitel 3 vorgestellt.

Ziel der Darstellung, des Vergleichs und der Interpretation der Potenzialangaben aus der Literatur (s. Kapitel 4) ist es, den verschiedenen sektoralen Arbeitsgruppen eine Grundlage für die Diskussionen um mögliche zukünftige THG-Minderungen in NRW zu liefern. Zudem werden anschließend in Kapitel 5 besonders relevante Lücken im wissenschaftlichen Verständnis über vorhandene Minderungspotenziale in den einzelnen Sektoren genannt, die im Idealfall mit Hilfe von neuen wissenschaftlichen Studien zu schließen oder zumindest zu verkleinern sind.

### **3. Betrachtete Studien mit Angaben zu Emissionsminderungspotenzialen**

In diesem Kapitel werden diejenigen Studien vorgestellt, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit als relevante Studien in Bezug auf die Frage nach THG-Minderungspotenzialen analysiert wurden und deren Erkenntnisse im nachfolgenden Kapitel 4 für die verschiedenen Sektoren zusammengefasst und diskutiert werden. Dabei wird unterschieden zwischen solchen Studien, aus denen Potenziale für alle oder mehrere Sektoren abgeleitet werden können (Abschnitt 3.1) und solchen Studien, die lediglich zu einem bestimmten Sektor Aussagen treffen (Abschnitt 3.2). Über die in diesem Kapitel genannten Studien hinaus wurden für die einzelnen Sektoren zum Teil eine Vielzahl weiterer Literaturquellen identifiziert, die in gewisser Weise Aussagen zu THG-Minderungspotenzialen enthalten. Nach näherer Untersuchung wurde allerdings entschieden, dass diese Literaturquellen für eine systematische Abschätzung der zukünftigen sektoralen THG-Emissionen nicht in Betracht kommen, z. B. weil dort lediglich Fallbeispiele betrachtet werden, die nicht als repräsentativ für den gesamten Sektor in Deutschland bzw. in NRW angesehen werden können.

#### **3.1. Sektorübergreifende Studien**

Die Studie **Energiezukunft 2050** (EnBW et al. 2009) wurde gemeinsam von den vier großen deutschen Stromkonzernen EnBW, EON, RWE und Vattenfall in Auftrag gegeben. Erarbeitet wurde die Studie von der Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE). Ziel der Studie ist die Beschreibung der wahrscheinlichen Entwicklung des

deutschen Energiesystems unter verschiedenen Voraussetzungen.<sup>2</sup> Zu diesem Zweck werden drei Szenarien erstellt. Das erste Szenario (Szenario 1) stellt eine Referenzentwicklung dar und beschreibt die Entwicklung des Energiesystems unter der Annahme, dass die wesentlichen Einflussfaktoren auf das Energiesystem gegenüber heute bzw. gegenüber der jüngeren Vergangenheit konstant bleiben. In Szenario 2 werden hingegen deutlich weitergehende technische Effizienzverbesserungen im Zeitverlauf unterstellt. Szenario 3 berücksichtigt zusätzlich zu den technischen Effizienzverbesserungen aus Szenario 2 bewusste Verhaltensänderungen, die den Energiebedarf reduzieren. Szenario 3 wird im Folgenden als Basis für Emissionsminderungspotenziale herangezogen, da es in Bezug auf den Klimaschutz das ambitionierteste Szenario der Studie darstellt, auch wenn lediglich eine vergleichsweise geringe Reduktion der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen um knapp 70 % bis 2050 (gegenüber 1990) erreicht wird. Die Studie ist in Bezug auf die Energienachfrage in den einzelnen Nachfragesektoren sehr detailliert.

Die Studie **Politiksznarien für den Klimaschutz V – auf dem Weg zum Strukturwandel** (UBA 2009b) wurde von einem Konsortium unter der Leitung des Öko-Institut erstellt und vom Umweltbundesamt veröffentlicht. Mit einem Zeithorizont bis 2030 werden zwei verschiedene Szenarien zum Energiebedarf und den Treibhausgasemissionen in den Verbrauchssektoren sowie im Umwandlungssektor entwickelt. Im Fokus der Studie steht die Bestimmung der Auswirkungen von bereits beschlossenen wie auch von möglichen zukünftigen energie- und klimaschutzpolitischen Maßnahmen auf die bundesdeutschen THG-Emissionen. Für die Ableitung von Minderungspotenzialen in der vorliegenden Studie wurde auf das „Strukturwandel-Szenario“ zurückgegriffen, da es weitergehende klimapolitische Maßnahmen vorsieht und daher auch tiefere THG-Emissionsminderungen erreicht als das andere Szenario der Studie.

Die Studie **Modell Deutschland – Klimaschutz bis 2050** (WWF 2009) wurde von WWF Deutschland in Auftrag gegeben. Die Erarbeitung erfolgte durch Prognos und Öko-Institut. Das zentrale Ziel der Studie ist es, Wege aufzuzeigen, wie die deutschen THG-Emissionen gegenüber 1990 bis 2050 um rund 95 % gesenkt werden können. Neben einem Referenzszenario, das dieses Ziel deutlich verfehlt, werden alternative Klimaschutzszenarien erstellt. Besonders ausführlich werden dabei die beiden Szenarien „Innovation ohne CCS“ und „Innovation mit CCS“ dokumentiert, die jeweils bis 2050 eine THG-Emissionsreduktion von knapp 90 % erreichen. Diese beiden Szenarien unterscheiden sich in der angenommenen Entwicklung des Stromsystems. In einem der Szenarien wird auf die Nutzung von CCS<sup>3</sup>-Technologien im Kraftwerksbereich gesetzt, während in dem anderen Szenario hierauf verzichtet wird. Im Industriesektor wird in beiden Szenarien CCS eingesetzt. Beide „Innovationsszenarien“ werden bei der

---

<sup>2</sup> Im Gegensatz zu anderen im Rahmen dieser Arbeit analysierten Szenariostudien wird hier nicht von vornherein ein konkretes CO<sub>2</sub>-Reduktionsziel vorgegeben.

<sup>3</sup> CCS: CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung (Carbon Dioxide Capture and Storage)

folgenden Analyse der Emissionsminderungsoptionen in verschiedenen Sektoren berücksichtigt. Die quantitativen Angaben zu der Energie- und Emissionsentwicklung in den jeweiligen Sektoren sind sehr ausführlich, allerdings sind die Erläuterungen, wie genau diese Entwicklungen technisch erreicht werden können zum Teil (insbesondere im Industriesektor) sehr knapp.

Die Studie **Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung** (Schlesinger et al. 2010) wurde durch die Bundesregierung bzw. die zuständigen Ministerien (BMWi und BMU) in Auftrag gegeben. Erarbeitet wurde die Studie durch ein Konsortium bestehend aus dem Energiewirtschaftlichen Institut an der Universität zu Köln (EWI), der Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung (GWS) und Prognos. Neben einem Referenzszenario wurden vier verschiedene Zielszenarien erstellt, die sich in der Dauer der Laufzeitverlängerung für Atomkraftwerke unterscheiden. Für die Zielszenarien wurden seitens der Bundesregierung unter anderem die Zielvorgaben gemacht, dass sie kompatibel mit einer Reduktion der THG-Emissionen um 40 % bis 2020 und um 85 % bis 2050 (jeweils gegenüber 1990) sind. Die Szenarien sollten eine sachliche Grundlage für die Erarbeitung des Energiekonzepts der Bundesregierung darstellen und notwendigen Handlungsbedarf zum Erreichen der mittel- bis langfristigen Ziele verdeutlichen. Die Studie ist in ihrer Beschreibung insbesondere der Nachfrageentwicklung in den verschiedenen Sektoren weniger detailliert als beispielsweise die Szenariostudien von WWF (2009) und EnBW u. a. (2009).

Die Studie **NRW-Klima2020 – Beitrag Nordrhein-Westfalens zur Erreichung des nationalen Klimaschutzziels** (EUtech 2008) wurde im Auftrag der NRW-Landtagsfraktion von Bündnis 90/Die Grünen erstellt. Sie untersucht, wie weit und in welchen Bereichen die THG-Emissionen des Landes NRW bis zum Jahr 2020 reduziert werden können. Damit ist diese Studie die einzige vorliegende wissenschaftliche Ausarbeitung, die systematisch das Minderungspotenzial speziell für das Land NRW untersucht. Allerdings ist der Betrachtungshorizont gegenüber der in der vorliegenden Untersuchung im Mittelpunkt stehenden Frage des langfristigen Klimaschutzes sehr kurz und die NRW-spezifischen Angaben mussten in vielen Bereichen über vereinfachte Annahmen aus bundesweiten Studien abgeleitet werden.

Die Studie **Energietechnologien 2050 – Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung** (Fraunhofer ISI 2010) entstand im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) im Sommer 2008 ausgeschriebenen, gleichnamigen Vorhabens. Die Erarbeitung der Studie erfolgte durch ein Konsortium aus verschiedenen wissenschaftlichen Instituten (Fraunhofer ISI, Forschungszentrum Jülich u. a.) und Industrieunternehmen (RWE AG, E.ON AG, Siemens AG). Sie untersucht auf Basis von drei verschiedenen Zukunftsszenarien mögliche energiewirtschaftlich und umweltpolitisch relevante Entwicklungen für Deutschland bis zum Jahr 2050. Unter-



sucht werden die Themenbereiche Energieeffizienz in Industrie, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) und Haushalten, erneuerbare Energien, Energiespeicher, fossil basierte Energieumwandlung, Stromnetze, Wasserstoff, stationäre Brennstoffzellen und die Methanolwirtschaft.

Die Ende 2011 fertiggestellte Studie **Energieeffizienz: Potenziale, volkswirtschaftliche Effekte und innovative Handlungs- und Förderfelder für die Nationale Klimaschutzinitiative** (IFEU et al. 2011) wurde im Rahmen der „BMU-Klimaschutzinitiative“ aus Mitteln des BMU finanziert und durch die beiden Institute IFEU und Fraunhofer ISI in Zusammenarbeit mit Prognos und GWS (sowie weiteren Unterauftragnehmern) erstellt. Ziel der Studie war es insbesondere, Potenziale der Energieeffizienz zu identifizieren, die über eine Referenzentwicklung hinausgehen und für den politisch angestrebten, ambitionierten langfristigen Klimaschutz erschlossen werden müssen. Die Studie adressiert auch die volkswirtschaftlichen Konsequenzen der Realisierung weitreichender Energieeinsparungen und diskutiert die Rolle, die Rolle finanzieller Förderung, spezielle der Nationalen Klimaschutzinitiative in einem solchen Prozess. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Erkenntnisse dieser Studie für die Ergänzung der Potenzialangaben im Industriesektor verwendet.

## 3.2. Sektor-spezifische Studien

### 3.2.1. Studien speziell zum Sektor „Umwandlung“

Die Studie **Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global – Leitstudie 2010** (BMU 2011) ist eine Aktualisierung von bereits in den vorherigen Jahren erschienenen Studien im Auftrag des Bundesumweltministeriums. Die fachliche Erarbeitung erfolgte durch eine Arbeitsgemeinschaft bestehend aus dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), dem Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) und dem Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE). Das zentrale Ziel dieser Studie ist es aufzuzeigen, wie eine Reduktion der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen innerhalb von Deutschland um 85 bis 90 % bis 2050 (gegenüber 1990) gelingen kann. Als wesentliches Element für die Zielerreichung wird der Ausbau der erneuerbaren Energien gesehen, der detailliert beschrieben wird. In dem ausführlich dokumentierten Basisszenario 2010 A, das für die Potenzialbestimmung im Umwandlungssektor herangezogen wird, erfolgt der Atomenergieausstieg zwischen 2020 und 2025 und es wird keine Nutzung der CCS-Technologie angenommen. Im Gegensatz zum Umwandlungssektor wird die Entwicklung in den einzelnen Nachfragesektoren nicht im Detail beschrieben, weshalb diese Studie nicht für die Potenziale in diesen Sektoren herangezogen wird.

Die Studie **Klimaschutz: Plan B 2050** (Greenpeace 2009) wurde von Greenpeace Deutschland in Auftrag gegeben und von EUTech Energie & Management erarbeitet. Neben einem Referenzszenario wird ein alternatives Szenario namens „Plan B“ erstellt. Die in diesem Szenario beschriebene Entwicklung des Umwandlungssektors wird in der Diskussion des THG-Minderungspotenzials dieses Sektors in Abschnitt 4.1 berücksichtigt. Das wesentliche Ziel des Plan B-Szenarios ist die aus Gründen des Klimaschutzes für nötig erachtete inländische Reduktion der Treibhausgasemissionen um 90 % bis Mitte des Jahrhunderts (gegenüber 1990). Es wird keine Nutzung von CCS-Technologien angenommen und ein Ausstieg aus der Atomenergie erfolgt bereits bis zum Jahr 2015. Im Gegensatz zu vielen anderen Klimaschutzszenarien wird auch gegen Ende des Betrachtungszeitraums kein Import von Strom aus erneuerbaren Energien unterstellt. Wie auch in der Leitstudie 2010 (BMU 2010) wird die Entwicklung in den einzelnen Nachfragesektoren nicht im Detail beschrieben, weshalb diese Studie nicht für die Potenziale in diesen Sektoren herangezogen wird.

Die Studie **Energieszenarien 2011** (Schlesinger et al. 2011) stellt eine Aktualisierung der bereits vorgestellten „Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung“ (siehe Abschnitt 3.1) dar. Auch diese Studie wurde von dem Konsortium bestehend aus dem Energiewirtschaftlichen Institut an der Universität zu Köln (EWI), der Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung (GWS) und Prognos erstellt. In der aktualisierten Fassung berücksichtigt die Studie in ihrem Szenario „Ausstieg“ den Atomausstiegsbeschluss der Bundesregierung vom Sommer 2011. Der deutlich beschleunigte Atomausstieg ist die wesentliche Änderung der neuen Szenarien. Für die Potenzialbestimmung in den Nachfragesektoren wird daher auf die Vorgängerstudie aus dem Jahr 2010 zurückgegriffen, die den Vorteil hat, dass ihr Betrachtungshorizont bis 2050 reicht, während die Szenarien in der aktualisierten Form lediglich bis 2030 laufen.

Das Sondergutachten **Wege zur 100 % erneuerbaren Stromversorgung** (SRU 2011) des Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) zeigt auf, wie bis 2050 die Stromversorgung in Deutschland auf eine vollständige Versorgung aus erneuerbaren Energien umgestellt werden kann. Der SRU unterscheidet dabei drei verschiedene Szenariofamilien, die sich in der Art der Vernetzung des Stromsystems mit dem Ausland unterscheiden. So wird in der ersten Szenariofamilie eine autarke Stromversorgung beschrieben, die auf keinen Austausch mit dem Ausland angewiesen ist. In der zweiten Szenariofamilie wird ein Stromaustausch mit Dänemark und Norwegen angenommen, während in der dritten Szenariofamilie ein Stromaustausch innerhalb von Europa sowie Nordafrika unterstellt wird. Es handelt sich jeweils um Szenariofamilien, da in allen Fällen das Stromsystem sowohl für eine relativ niedrige Stromnachfrage (509 TWh) als auch für eine relativ hohe Stromnachfrage (700 TWh) im Jahr 2050 modelliert wird. Unter den jeweils gegebenen Randbedingungen wird unter Rückgriff auf ein Stromsystemmodell der DLR die kostengünstigste (vollständig erneuerbare) Stromversorgung modelliert.

Bei der Diskussion des THG-Minderungspotenzials des Umwandlungssektors in Abschnitt 4.1 wird exemplarisch das Szenario 2.1.a betrachtet, in dem die inländische Stromnachfrage relativ niedrig ist und Deutschland einen begrenzten (und ausgeglichenen) Stromaustausch mit Dänemark und Norwegen betreibt.

Die Studie **Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen** (UBA 2010a) wurde vom Umweltbundesamt (UBA) erstellt. Die Studie beschreibt drei verschiedene Szenarien, wie Deutschland im Jahr 2050 seinen Strom vollständig aus erneuerbaren Quellen beziehen kann. Das Szenario Regionenverbund setzt im Wesentlichen auf die inländischen Potenziale und einen deutschlandweiten Stromaustausch. Im Szenario International-Großtechnik basiert die Stromversorgung Deutschlands 2050 zu bedeutenden Teilen auf großtechnisch erschließbaren Potenzialen in Deutschland, Europa und Nordafrika. Das dritte Szenario Lokal-Autark setzt hingegen auf eine vollständig autarke Stromversorgung einzelner Regionen Deutschlands. Dies erfordert die weitgehende Nutzung aller technisch-ökologischen Potenziale in den verschiedenen Regionen und eine Ausschöpfung aller Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung. Ausführlich beschreibt die UBA-Studie lediglich das Szenario Regionenverbund, das daher auch im nächsten Kapitel bei der Ableitung von THG-Minderungsoptionen im Umwandlungssektor diskutiert wird.

Die Studie **Potentiale Erneuerbarer Energien im Regierungsbezirk Arnsberg** (Siemens 2011) wurde von der Bezirksregierung Arnsberg in Auftrag gegeben. Basierend auf einer Ist-Analyse werden die Potenziale für eine stärkere Nutzung erneuerbarer Energien für die Stromerzeugung und Wärmebereitstellung bis zum Jahr 2020 bestimmt. Zwar stellt der Regierungsbezirk Arnsberg nur einen Teil von NRW dar (etwa ein Viertel der Fläche) und der Betrachtungszeitraum der Studie ist begrenzt, dennoch wird diese Studie – gerade in Anbetracht des (noch) herrschenden Mangels an entsprechenden Untersuchungen für das gesamte Bundesland – als eine wichtige Informationsquelle für die Ableitung von Emissionsminderungspotenzialen im nordrheinwestfälischen Umwandlungssektor gesehen und als solche in Abschnitt 4.1 diskutiert.

Die Studie **Potenzialerhebung von Kraft-Wärme-Kopplung in Nordrhein-Westfalen** (Eikmeyer et al. 2011) wurde im Auftrag des MKULNV durch ein Konsortium unter der Leitung des Bremer Energie Institut erstellt. Ziel der Studie war es, „die realistischen, d. h. die technisch machbaren und wirtschaftlichen KWK-Potenziale für NRW auf der Basis einer Vollversorgung mit leitungsgebundener Wärme zu identifizieren“. Zu diesem Zweck wurden vorläufige Ergebnisse der Studie in regelmäßigen Abständen rund 20 Vertreterinnen und Vertretern von Energieversorgungsunternehmen, Verbänden, der EnergieAgentur.NRW sowie des Auftraggebers zur Diskussion gestellt. Die Studie unterscheidet dabei zwischen der industriellen KWK-Nutzung sowie der

„Siedlungs-KWK“, d. h. KWK-Nutzung in den Sektoren Private Haushalte sowie Gewerbe, Handel, Dienstleistungen.

### **3.2.2. Studien speziell zum Sektor „Produzierendes Gewerbe/Industrie“**

Die Studie **Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland – Sektorperspektive Industrie** (McKinsey Deutschland 2007a) ist eine vom Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI) in Auftrag gegebene Studie, die von McKinsey & Company erstellt wurde. Die „Sektorperspektive Industrie“ stellt dabei eine von mehreren Sektor-Studien innerhalb der Veröffentlichungsreihe dar. Der Schwerpunkt der Studien liegt in der Identifizierung von THG-Vermeidungspotenzialen und THG-Vermeidungskosten in den jeweiligen Sektoren bis zum Jahr 2030. Die explizite Ausweisung von THG-Minderungspotenzialen für einzelne Industriesektoren sowie die Zuweisung von Kosten für die unterschiedlichen Vermeidungsoptionen stellen dabei Besonderheiten dieser Studie gegenüber anderen Potenzial- bzw. Szenariostudien dar.

Die Studie **Klimavorsorgeverpflichtung der deutschen Wirtschaft – Monitoringbericht 2010** (RWI 2011) wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, dem Bundesministeriums der Finanzen sowie dem Bundesverband der Deutschen Industrie in Auftrag gegeben und vom Rheinisch-Westfälischen Institut für Wirtschaftsforschung (RWI) erstellt. Ziel der Studie ist es, den Grad der Zielerreichung der im Jahr 1996 mit der damaligen Bundesregierung geschlossenen freiwilligen Selbstverpflichtung der deutschen Wirtschaft zur Reduktion von Treibhausgasemissionen (-20 % der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich zum Bezugsjahr 1990) festzustellen. Für jeden der 19 betrachteten Industriebereiche werden die bis zum Jahr 2010 erzielten Emissionsminderungen ins Verhältnis gesetzt zu der im Jahr 1996 gegebenen Zusage zur Emissionsreduktion. Einer sich anschließenden Ursachenanalyse folgen jeweils ein kurzer Ausblick sowie mögliche Maßnahmen zur weiteren Minderung der Emissionsmengen.

### **3.2.3. Studie speziell zum Sektor „Bauen/Wohnen und GHD“**

Die **Shell Hauswärme-Studie** (Shell 2011) wurde von Shell in Auftrag gegeben und vom Hamburgischen WeltWirtschaftsinstitut sowie von IFEU erarbeitet. Die Studie ist Ende 2011 erschienen. Die Studie stellt mehrere Szenarien für eine nachhaltige Wärmeversorgung privater Haushalte auf, die sich unter anderem in Bezug auf die Sanierungsraten und Sanierungstiefen unterscheiden. Die entwickelten Szenarien werden in Hinblick auf Emissionsreduktionen und Kosten verglichen. Für die Potenzialuntersuchung im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde das Szenario mit der höchsten CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion ausgewählt.

### 3.2.4. Studien speziell zum Sektor „Verkehr“

Das Umweltbundesamt hat im Jahr 2007 die Studie **Klimaschutz in Deutschland - 40%-Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2020 gegenüber 1990** (UBA 2007a) veröffentlicht. Für den Zeitraum von 1990 bis 2020 wurden für den Personen- und für den Güterverkehr auf der Straße Maßnahmen, mit denen diese Verkehre effizienter abgewickelt werden können, hinsichtlich ihres Potenzial zur Minderung verkehrsbedingter CO<sub>2</sub>-Emissionen abgeschätzt. Bei den Maßnahmen, die in der Studie bewertet werden, handelt es sich unter anderem um die Senkung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs durch Fahrertrainings, die Verwendung von Leichtlaufreifen und Leichtlaufölen, sparsamere Motoren, eine CO<sub>2</sub>-abhängige Kfz-Steuer, die Erhöhung der Energiebesteuerung für Kraftstoffe, die Einführung verbindlicher Verbrauchsgrenzwerte für Pkw und die Ausweitung der Lkw-Maut. Maßnahmen zur Vermeidung von motorisierten Verkehren oder deren Verlagerung auf kohlenstoffärmere oder kohlenstofffreie Verkehrsträger, die in der Studie aufgegriffen werden, sind die Senkung des Verkehrsaufkommens durch eine verkehrssparende Siedlungsplanung, die Optimierung der Verkehrsführung, die Verstetigung des Verkehrsflusses, die Förderung des ÖPNV durch eine bessere Finanzierung des Systems, die Förderung des Radverkehr durch den Ausbau seiner Infrastruktur, eine mögliche Ausrichtung der Städtebauförderung an den Siedlungsstrukturen, den Ersatz der Grunderwerbssteuer durch eine Neubesiedelungssteuer und die Reduzierung der Pendlerpauschale für Neusiedler im Umland der Städte.

Die Studie **Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland - Sektorperspektive Transport** (McKinsey Deutschland 2007b) wurde 2007 vom McKinsey & Company im Auftrag des Bundesverbandes der deutschen Industrie erstellt. In dieser Studie wurden sehr detailliert für Pkw, leichte und schwere Nutzfahrzeuge, den Schienenpersonen- und -güterverkehr und den Luftverkehr die Einsparpotenziale in erster Linie technische Maßnahmen zur Senkung des spezifischen Energieverbrauchs bis zum Jahr 2030 dargestellt. Für Diesel-Pkw sind dies beispielsweise die Nutzung von Start-Stop-Systemen oder die Automatisierung der Schaltsysteme, für benzinbetriebene Fahrzeuge Reifendruckkontrollsysteme oder Maßnahmen zur Minderung der Motorreibung. Für leichte und schwere Nutzfahrzeuge werden beispielsweise verschiedenen alternative Antriebssysteme und Kraftstoffe bewertet, für den Schienenverkehr Maßnahmen zur technischen Optimierung und Maßnahmen zur Erhöhung der Auslastung. Gleiches gilt für den Flugverkehr, auch hier wurden technische und organisatorische Maßnahmen bewertet. Zusätzlich schätzt die Studie ab, welche Maßnahmen unter wirtschaftlich tragfähigen Bedingungen umgesetzt werden können und bei welchen Maßnahmen dies nicht oder nur in geringerem Maße der Fall ist.

Das Fraunhofer Institut hat im Auftrag des Umweltbundesamtes die **Wirkung des Integrierten Energie- und Klimaprogramms (IEKP)** (Doll et al. 2012) der großen

Koalition vom 23.08.2007, bekannt als die Meseberger Beschlüsse, auf die Entwicklung der Treibhausgasemissionen in den verschiedenen Sektoren in Deutschland im Jahr 2020 abgeschätzt. Für den Verkehrssektor umfasst das IEKP fast ausschließlich technische und organisatorische Maßnahmen zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Straßenverkehr. Für den Pkw-Verkehr sind dies unter anderem Maßnahmen zur Ausweitung der Nutzung von Biokraftstoffen, die Einführung verbindlicher CO<sub>2</sub>-Grenzwerte für Pkw oder die Förderung der Elektromobilität. Für den Lkw-Verkehr wird im IEKP eine Ausweitung der Lkw-Maut und ihre stärkere Spreizung auf Basis der Energieverbräuche der Fahrzeuge vorgeschlagen. Zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Flugverkehrs greift das IEKP die mögliche Einbindung des Flugverkehrs ins Emissionshandelssystem auf. Konkrete Maßnahmen zur Vermeidung motorisierter Verkehre oder zu deren Verlagerung beinhaltet das IEKP dagegen nicht.

Das Ziel der vom Umweltbundesamt erarbeiteten und 2009 veröffentlichten Studie **Strategie für einen nachhaltigen Güterverkehr** (UBA 2009a) ist es, für den erdgebundenen Güterverkehr Maßnahmen aufzuzeigen, mit denen die vom Güterverkehr auf der Straße, der Schiene und durch das Binnenschiff verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen reduziert werden können. Die Studie nimmt basierend auf dem Jahr 2005 für verschiedene Maßnahmen aus den Bereichen Vermeidung, Verlagerung und effiziente Abwicklung eine Wirkungsabschätzung für das Jahr 2020 vor.

Bei der vom Umweltbundesamt erstellten Studie **CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland: Mögliche Maßnahmen und ihre Minderungspotenziale – Ein Sachstandsbericht des Umweltbundesamtes** (UBA 2010b) aus dem Jahr 2010 handelt es sich um eine Fortschreibung der ebenfalls vom Umweltbundesamt erstellten Vorgängerstudie aus dem Jahr 2003. Für die Handlungsfelder Pkw-Verkehr, Straßengüterverkehr, ÖPNV, Schienenpersonen- und Schienengüterverkehr sowie Flugverkehr wird die CO<sub>2</sub>-Minderungswirkung von Effizienz-, Verlagerungs- und Vermeidungsmaßnahmen abgeschätzt und einem Trendszenario gegenübergestellt. Bei den bewerteten Maßnahmen zur Vermeidung motorisierter Verkehre handelt es sich beispielsweise um die Schaffung verkehrssparender Siedlungsstrukturen, die Abschaffung der Pendlerpauschale oder die Förderung regionaler Wirtschaftskreisläufe, Maßnahmen zur Verlagerung von Pkw-Verkehren, welche die Studie berücksichtigt, sind unter anderem die Förderung der Nutzung des Fahrrads und des ÖPNVs. Maßnahmen zur Marktdurchdringung sparsamerer Fahrzeuge sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr auf der Straße sind unter anderem die Einführung einer CO<sub>2</sub>-basierten Kraftfahrzeugsteuer oder die räumliche und fahrzeugspezifische Ausweitung und Weiterentwicklung der Lkw-Maut.

Die **Shell LKW-Studie - Fakten, Trends und Perspektiven im Straßengüterverkehr bis 2030** (Shell 2010) widmet sich den Potenzialen zur Minderung des Energiever-

brauchs im straßengebundenen Güterverkehr bis zum Jahr 2030. Auch hier wird anhand von zwei Szenarien, einem Trend- und einem Klimaschutzszenario, die CO<sub>2</sub>-Minderungswirkung zusätzlicher Klimaschutzmaßnahmen für den Lkw-Verkehr dargestellt. Bei den dem Szenario zu Grunde gelegten Maßnahmen handelt es sich fast ausschließlich um fahrzeugtechnische Maßnahmen, die Minderungswirkung einer möglichen Verlagerung von Straßengüterverkehr auf die klimaschonendere Schiene oder das Binnenschiff wird nicht angenommen. Daher weisen die beiden Szenarien keinen absoluten Rückgang der CO<sub>2</sub>-Emissionen dar, sondern einen weiteren Anstieg. Dieser fällt im Klimaschutzszenario jedoch aufgrund einer gegenüber dem Trendszenario angenommenen ambitionierteren Umsetzung der Maßnahmen geringer aus.

### **3.2.5. Studie speziell zum Sektor „Landwirtschaft, Forst, Boden“**

Die Studie **Klimawirkungen der Landwirtschaft in Deutschland** (IÖW 2008) im Auftrag der Nichtregierungsorganisation foodwatch untersucht das gegenwärtige Ausmaß und die mögliche zukünftige Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der deutschen Landwirtschaft. Speziell werden die Klimawirkungen der landwirtschaftlichen Produktion wichtiger Agrarprodukte (z. B. Weizen, Milch und Schweinefleisch) abgeschätzt und es wird untersucht, inwiefern es Unterschiede in der Klimawirkung zwischen konventioneller und ökologischer Landwirtschaft gibt. Darüberhinaus werden verschiedene Maßnahmen und Strategien diskutiert, durch die die Landwirtschaft „einen erheblichen Beitrag zur Erreichung der deutschen Klimaschutzziele leisten“ kann. Zu diesen Maßnahmen und Strategien zählen die Autoinnen und Autoren der Studie eine Ausweitung der ökologischen Landwirtschaft, Veränderungen der Produktionsweisen und Aufgabe oder Extensivierung genutzter Moorflächen.

### **3.2.6. Studie speziell zum Sektor „Private Haushalte“**

Die **Erhebung „Wo im Haushalt bleibt der Strom?“** der EnergieAgentur.NRW (2011) liefert eine Auswertung der Stromverbrauchsdaten von 380.000 Ein- bis Sechspersonen-Haushalten. Dabei wird der durchschnittliche jährliche Stromverbrauch nach Haushaltsgröße aufgeführt und nach 15 verschiedenen Verbrauchsbereichen unterschieden. Mit Anteilen von jeweils 9 bis 13 % dominieren im Schnitt die Bereiche „Büro“ (13 %), „TV/Audio“ (12 %), „Warmwasser“ (12 %), „Kühlen“ (10 %), „Licht“ (10 %) und „Kochen“ (9 %) den Stromverbrauch. Die Datensätze unterscheiden zusätzlich noch zwischen Haushalten mit und ohne elektrische Warmwasseraufbereitung.

## 4. Sektorale Potenziale

### 4.1. Umwandlungssektor

#### 4.1.1. Einleitung

Im Folgenden werden mögliche Treibhausgasminderungspfade bis zum Jahr 2050 für den Umwandlungssektor in NRW diskutiert. Dabei werden sechs grundsätzliche Minderungsoptionen (Handlungsfelder) unterschieden:

- Erhöhung der Wirkungsgrade fossiler Kraftwerke durch Kraftwerksertüchtigung oder -neubau mit gleichem Brennstoff
- Verringerung des Braun- und Steinkohleanteils im fossilen Energieträgermix
- Effizientere Nutzung fossiler Energieträger durch Erhöhung des KWK-Anteils (im Bereich der öffentlichen KWK, der industriellen KWK, der dezentralen KWK sowie der Objektversorgung)
- Einsatz von Carbon Capture & Storage (CCS) bzw. Carbon Capture & Use (CCU)
- Verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien für die Strom- und Wärmeerzeugung
- Minderungen des Strom- und Wärmebedarfs beim Endverbrauch

#### 4.1.2. Erhöhung der Wirkungsgrade fossiler Kraftwerke durch Kraftwerksertüchtigung oder -neubau mit gleichem Brennstoff

Eine Option zur Minderung der THG kann in der Erhöhung der Umwandlungseffizienz bestehender Anlagen zur Nutzung fossiler Energieträger gesehen werden. Dies umfasst einerseits Ertüchtigungsmaßnahmen an bestehenden Kraftwerken, andererseits die Möglichkeit des Ersatzes von bestehenden Anlagen (am Ende ihrer Nutzungszeit) durch neue Anlagen mit höherem Wirkungsgrad. Mittelfristig sind durch eine solche Strategie insbesondere in NRW, mit seinen relativ alten Kohlekraftwerken, grundsätzlich THG-Emissionsreduktionen in relevantem Umfang möglich.

So weist der Braunkohlekraftwerkspark in NRW derzeit einen durchschnittlichen (Netto-) Wirkungsgrad von etwa 33 % auf<sup>4</sup>. Unter der Annahme, dass alle bestehenden, mindestens 20 Jahre alten Braunkohlekraftwerke bis 2030 durch neue, moderne („BoA“ bzw. „BoAplus“) Braunkohlekraftwerke ersetzt werden würden, so ließe sich der

---

<sup>4</sup> Alle Angaben in diesem Abschnitt zu derzeitigen durchschnittlichen Wirkungsgraden sowie zu Brennstoff- und CO<sub>2</sub>-Einsatz basieren auf der „Energiebilanz und CO<sub>2</sub>-Bilanz NRW 2009“ (IT.NRW 2009).



durchschnittliche Wirkungsgrad bis dahin auf rund 43 % erhöhen. Dies entspräche einer Verringerung des spezifischen Brennstoffbedarfs und der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen um ca. ein Viertel. Unter der Annahme einer gleichbleibenden Stromerzeugung aus Braunkohlekraftwerken käme es auch absolut betrachtet zu einer proportionalen Reduktion des Brennstoffeinsatzes und der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Bezogen auf die ca. 80 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>, die von den Braunkohlekraftwerken in NRW im Jahr 2009 ausgestoßen wurden, könnte demnach der Ausstoß um etwa 20 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr reduziert werden. Diese Menge entspricht rund 7 % der derzeitigen jährlichen energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen NRWs.

Bezogen auf den ebenfalls relativ alten Steinkohlekraftwerkspark in NRW – mit einem durchschnittlichen Netto-Wirkungsgrad von heute ungefähr 35 % – wäre bei einer vollständigen Erneuerung dieser Kraftwerke auch hier eine Reduktion der spezifischen Emissionen um etwa ein Viertel denkbar. Der durchschnittliche Wirkungsgrad könnte bei einer weitgehend abgeschlossenen Erneuerung im Jahr 2030 dann bei 45 % liegen. Die korrespondierenden Emissionen der Steinkohlekraftwerke könnten sich demnach (bei erneut angenommener gleichbleibender Stromerzeugung aus diesen Kraftwerken) von rund 40 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> auf rund 30 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> verringern.

Bei einem Ersatz der bestehenden Erdgaskraftwerke mit einem heutigen Alter von über 15 Jahren durch neue, hocheffiziente GuD-Kraftwerke ließe sich der durchschnittliche Netto-Wirkungsgrad von derzeit rund 40 % auf etwa 55 % erhöhen und somit der spezifische Brennstoffbedarf und CO<sub>2</sub>-Ausstoß auch hier um etwas über ein Viertel reduzieren. Bezogen auf die gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen von Gaskraftwerken in NRW in 2010 in Höhe von 17 Mio. Tonnen, ließen sich so – bei unterstellter gleichbleibender Stromerzeugung – knapp 5 Mio. Tonnen einsparen.

Das über die nächsten beiden Jahrzehnte bei gleichbleibender Stromerzeugung durch Kraftwerkssubstitution zu erschließende Potenzial liegt damit bei etwa 35 Mio. t und entsprechend rund 12 % der gesamten heutigen energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen in NRW. Allerdings würden damit bis 2030 neue fossile Kraftwerkskapazitäten aufgebaut, die bei einer unterstellten konstanten Stromerzeugung und ohne weitergehende Maßnahmen (z. B. CCS, Brennstoffwechsel) einen CO<sub>2</sub>-Ausstoß von mehr als 100 Mio. t CO<sub>2</sub> strukturell über einen längeren Zeitraum festlegen würden.

Wirkungsgradsteigerungen sind allerdings nicht nur bei Kraftwerksneubauten realisierbar. Alternativ können bei bestehenden Kraftwerken durch Optimierungen der Anlagenkomponenten oder des thermodynamischen Prozesses die Wirkungsgrade im Prozentpunktbereich erhöht werden. Durch solche „Ertüchtigungen“ kann zwar nicht das hohe Wirkungsgradniveau von neuen Kraftwerken erreicht werden, allerdings liegen die Kosten auch deutlich niedriger als im Neubau-Fall. Zudem haben Ertüchti-

gungen gegenüber Kraftwerksneubauten den Vorteil, dass sie sich deutlich schneller amortisieren und somit keine Kraftwerkskapazitäten langfristig strukturell festschreiben.

Aufgrund fehlender Studien zu dieser Frage wird hier das CO<sub>2</sub>-Minderungspotenzial basierend auf theoretischen Maßzahlen ermittelt. Dabei wird vereinfacht davon ausgegangen, dass bei allen Kraftwerkstypen aufgrund des relativ hohen Durchschnittsalters Ertüchtigungen möglich sind und diese – nach einer weitgehenden Ertüchtigung der älteren Kraftwerke – zu einer Erhöhung des durchschnittlichen Wirkungsgrades bei Kohlekraftwerken um drei Prozentpunkte und bei Gaskraftwerken um acht Prozentpunkte führen. Dadurch würden der spezifische Brennstoffbedarf sowie CO<sub>2</sub>-Ausstoß gegenüber heute um rund 8 % bei Kohlekraftwerken und um rund 17 % bei Gaskraftwerken reduziert werden. Über alle Arten von Kraftwerken in NRW hinweg könnten so gegenüber heute – bei angenommener gleichbleibender fossiler Stromerzeugung – 12 bis 13 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> eingespart werden (vgl. Tabelle 1: 6,4 Mio. Tonnen bei den Braunkohlekraftwerken, 3,2 Mio. Tonnen bei den Steinkohlekraftwerken und 3 Mio. Tonnen bei den Gaskraftwerken).

**Tabelle 1: Theoretisch mögliche Reduktion der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen fossiler Kraftwerke in NRW infolge von Neubau- und Ertüchtigungsmaßnahmen**

Kraftwerksart nach Energieträger	Minderungsbezug	Minderung in 2030
<u>Ersatz</u> des Großteils der älteren Kraftwerke (Neubau)		
Braunkohle	Spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen der Stromerzeugung	ca. 25 %
Steinkohle		ca. 25 %
Erdgas		ca. 25 bis 30 %
<u>Ertüchtigung</u> des Großteils der älteren Kraftwerke		
Braunkohle	Spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen der Stromerzeugung	ca. 8 %
Steinkohle		ca. 8 %
Erdgas		ca. 17 %

#### 4.1.3. Verringerung des Braun- und Steinkohleanteils im fossilen Energieträgermix

Gegenüber Stein- und Braunkohle hat Erdgas pro Energieeinheit einen um etwa 40 % niedrigeren Kohlenstoffgehalt. Zudem ermöglichen moderne Erdgas-GuD-Kraftwerke

mit Wirkungsgraden von derzeit über 60 % höhere Wirkungsgrade bei der Stromerzeugung als selbst modernste Kohlekraftwerke, deren Wirkungsgradgrenzen bei deutlich unter 50 % liegen. Folglich kann in der Strom- und Wärmeerzeugung durch eine Verringerung des Kohleanteils im fossilen Energieträgermix eine signifikante Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen erreicht werden. Nach Lübbert (2007) liegen die CO<sub>2</sub>-Emissionen pro kWh-Strom bei einem modernen GuD-Erdgaskraftwerk mit 410 Gramm fast die Hälfte niedriger als bei einem modernen Steinkohlekraftwerk (790 Gramm) und sogar 58 % niedriger als bei einem modernen Braunkohlekraftwerk (980 Gramm)<sup>5</sup>.

Eine Verringerung des Kohleanteils im fossilen Erzeugungsmix kann grundsätzlich über die folgenden Optionen realisiert werden:

- Verringerung der Auslastung bestehender Kohlekraftwerke und -heizwerke und/oder höhere Auslastung bestehender Erdgaskraftwerke und -heizwerke
- (Schnellere) Stilllegung bestehender Kohlekraftwerke und -heizwerke und Ersatz durch Kraftwerke, die Brennstoffe mit geringerem Kohlenstoffgehalt einsetzen
- Bei notwendigem Neubau von fossil befeuerten Kraft- und Heizwerken auf Erdgas anstatt auf Kohle setzen

Der derzeitige (2010) Energieträgermix innerhalb der fossilen Stromerzeugung in NRW sieht nach MKULNV (2011) wie folgt aus:

- Braunkohle: 47 %
- Steinkohle: 35 %
- Erdgas (plus Mineralöl): 18 %

Rund 85 % der Stromerzeugung aus den Braunkohlekraftwerken in NRW stammte 2010 aus Kraftwerken, die vor 1985 errichtet wurden. Bei Steinkohlekraftwerken lag dieser Anteil in 2010 bei etwa 65 %.

Inwieweit die Möglichkeit der Verringerung des Kohleanteils an der Stromerzeugung in NRW ausgeschöpft werden kann, hängt von vielfältigen Rahmenbedingungen ab,

---

<sup>5</sup> Zusätzlich haben Erdgaskraftwerke (insbesondere Gasturbinen aber auch GuD-Kraftwerke) den Vorteil, dass sie eine vergleichsweise geringe Kapitalintensität aufweisen und über kurze An- und Abfahrzeiten verfügen. Sie eignen sich damit für den Lastfolgebetrieb ebenso gut wie für die Reservehaltung – beides Eigenschaften, die bei einem wachsenden Anteil von fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung zunehmend bedeutsam werden.

beispielsweise von der relativen Entwicklung der Energieträgerpreise sowie des CO<sub>2</sub>-Preises. Eine stärkere Realisierung dieser Optionen würde entweder gegenüber heute deutlich höhere CO<sub>2</sub>-Preis bzw. deutlich höhere CO<sub>2</sub>-Preiserwartungen voraussetzen, oder aber weitergehende Änderungen der energiepolitischen Vorschriften (z. B. hinsichtlich des Schnellstartverhaltens) und Rahmenbedingungen (z. B. Kapazitätsmechanismen). Positiv auf einen Anstieg des Erdgas-Anteils im fossilen Energieträgermix wirkt sich hingegen bereits jetzt die höhere gesellschaftliche Akzeptanz für Gaskraftwerke aus.

Der fossile Brennstoffmix kann neben dem hier fokussierten gezielten Ersatz- bzw. Neubau von Kraftwerken prinzipiell auch durch einen Brennstoffwechsel innerhalb bestehender Kraftwerke geändert werden. Beispielsweise können Öl-Kraftwerke, aber auch Kohlekraftwerke prinzipiell auf Erdgas umgestellt werden. Die dazu notwendigen Umrüstungen sind allerdings aus wirtschaftlichen Gründen i. d. R. nicht praktikabel. Eine eigenständige Abschätzung der prinzipiellen CO<sub>2</sub>-Minderungspotenziale dieser Option ist aufgrund fehlender Informationen über die technischen Möglichkeiten entsprechender Umrüstungen bei den Kraftwerken in NRW nicht möglich.

#### **4.1.4. Effizientere Nutzung fossiler Energieträger durch Erhöhung des KWK-Anteils**

Durch die Nutzung der Abwärme, die bei der thermischen Stromerzeugung zwangsläufig anfällt, können fossile Energieträger eingespart und dadurch CO<sub>2</sub>-Emissionen verringert werden. Die Bundesregierung hat bereits vor einigen Jahren das Ziel formuliert, dass bis zum Jahr 2020 25 % der deutschen Stromerzeugung aus KWK-Anlagen stammen sollen. Die rot-grüne Landesregierung möchte dieses Ziel „durch eine Landesquote von mehr als 25 % flankieren“, wie sie es im Koalitionsvertrag festgelegt hat. Im Jahr 2010 lag der Anteil der KWK an der Stromerzeugung in NRW bei knapp 10 % (MKULNV 2011).

Eikmeyer et al. (2011) haben im vergangenen Jahr die KWK-Potenziale in NRW untersucht und kommen zu dem Schluss, dass es sowohl im Bereich der Siedlungs- und der Objekt-KWK als auch bei der industriellen KWK „ausreichende Potenziale für einen Ausbau der KWK gibt und dass die angestrebte Erhöhung des KWK-Stromanteils auf über 25 % in NRW grundsätzlich möglich ist“. Die Studie weist darauf hin, dass das KWK-Potenzial in NRW aufgrund der hoch verdichteten Siedlungsbereiche wie dem Ruhrgebiet relativ gesehen höher ist als im Bundesdurchschnitt. Im Siedlungsbereich sei das Potenzial für die Wärmeabnahme problemlos vorhanden, um eine wärmeseitige Verdopplung des KWK-Anteils zu erreichen, solange eine hohe Anschlussrate erreicht werden kann. Bis zu 36 % des Nutzwärmebedarfs können der Studie zufolge bei einer Anschlussrate von 90 % wirtschaftlich über KWK bereitgestellt werden. Zusätzliches

Potenzial für Wärmesenken sieht die Studie bei der Industrie in NRW, wo gegenüber heute ein Anstieg der wirtschaftlich erschließbaren KWK-Wärmeversorgung um rund 60 % ermittelt wird.

Unter der Annahme, dass tatsächlich im Siedlungssektor eine Verdopplung der derzeitigen KWK-Nettowärmeerzeugung von heute rund 14 TWh auf 28 TWh bis 2020 erreicht werden kann, ließe sich auch Brennstoff zur (reinen) Wärmeerzeugung mit einem Energiegehalt von mindestens 14 TWh ersetzen. Diese zusätzliche KWK-Wärmebereitstellung könnte folglich den in Privathaushalten rund 15 % der derzeit für Raumwärme und Warmwasser genutzten fossilen Energieträger (v. a. Erdgas und Heizöl) ersetzen (MKULNV 2011). Für die NRW-Industrie schätzen Eikmeyer et al. (2011) den Wärmebedarf, der zusätzlich durch wirtschaftlich durch KWK gedeckt werden kann, auf etwa 10 TWh (gegenüber einer derzeitigen Nutzung von ca. 17 TWh).

Die korrespondierenden CO<sub>2</sub>-Minderungswirkungen des KWK-Ausbaus hängen von verschiedenen Faktoren ab, insbesondere von den in den KWK-Anlagen verwendeten Brennstoffen, der Brennstoffausnutzung in den Anlagen (d. h. auch dem Strom- zu Wärmeoutput-Verhältnis) sowie von den substituierten Optionen der getrennten Strom- und Wärmebereitstellung.

Wird beispielsweise angenommen, dass die ersetzten Brennstoffe im Durchschnitt einen CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor von Erdgas (202 g CO<sub>2</sub>/kWh, nach UBA 2007b) aufweisen, so würde eine zusätzliche KWK-Wärmebereitstellung von 24 TWh im Siedlungs- und Industriebereich bis 2020 gegenüber heute den Ausstoß von mindestens<sup>6</sup> 4,8 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr vermeiden, entsprechend knapp 2 % der gesamten derzeitigen energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen in NRW.

Voraussichtlich wird aufgrund eines stetig sinkenden Wärmebedarfs das Potenzial für KWK-Wärme nach 2020 nicht oder zumindest kaum mehr ansteigen. Insbesondere nach 2030 ist eher mit einer Abnahme des hier für 2020 zugewiesenen KWK-Minderungspotenzials zu rechnen.

**Tabelle 2: Mögliche Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen in NRW in Folge des Ersatzes fossiler Energieträger im Siedlungsbereich und in der Industrie in NRW durch eine deutliche Erhöhung der KWK-Wärmenutzung**

Minderungsbezug	Minderung in 2020
Energiebedingte CO <sub>2</sub> -Emissionen in NRW in 2009	ca. 2 %

<sup>6</sup> Da ausgehend vom Emissionsfaktor des Erdgases keine Umwandlungsverluste der verdrängten Wärmeerzeugung angenommen werden, ist hier von „mindestens“ die Rede.

#### **4.1.5. Einsatz von Carbon Capture & Storage (CCS) bzw. Carbon Capture & Use (CCU)-Technologien**

Eine weitere Möglichkeit, die THG-Emissionen des Umwandlungssektors zu reduzieren, besteht perspektivisch möglicherweise in dem Einsatz von CCS-Technologien, die das in Kohle- oder Gaskraftwerken entstehende CO<sub>2</sub> abscheiden und entweder über Pipelines zu geeigneten Speicherstätten leiten und dort langzeitstabil einlagern (CCS) oder aber bestimmten industriellen Prozessen zur Nutzung zur Verfügung stellen (CCU). Die Erforschung von Möglichkeiten der Nutzung bzw. Wiederverwertung von CO<sub>2</sub> wird heute zunehmend intensiv verfolgt. Insbesondere die CCS-Option ist in Politik, Wissenschaft und Öffentlichkeit derzeit umstritten. Zudem bestehen unterschiedliche Einschätzungen darüber, wann und zu welchen Kosten diese Technologien zur Verfügung stehen werden. Eine vollständige Vermeidung von Treibhausgasemissionen ist durch CCS bzw. CCU nicht möglich. Zum einen können die durch die Verbrennung der eingesetzten Energieträger entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen direkt am Kraftwerk – je nach Abscheidetechnik – nur zu rund 90 bis 99 % abgeschieden werden, zum anderen entstehen weiterhin THG-Emissionen in der Vorkette der Stromerzeugung, die sich durch CCS nicht vermeiden lassen, beispielsweise bei der Kohleförderung, die in der Gesamt-THG-Bilanz zu berücksichtigen sind.

Einige Energieszenarien für Deutschland nehmen die erfolgreiche Entwicklung und Kommerzialisierung dieser Technologien an, wobei – von Demonstrationsprojekten abgesehen – nicht vor 2020 mit dem Bau von CCS-Kraftwerken gerechnet wird. Insgesamt bleibt aber auch in diesen Szenarien die Bedeutung der CCS-Kraftwerke insbesondere im Vergleich zu der Bedeutung der verstärkten Nutzung erneuerbarer Energien als Minderungsoption begrenzt: Im Szenario „Innovation mit CCS“ (WWF 2009) erreichen Braunkohle- und Steinkohle-CCS-Kraftwerke 2030 gemeinsam einen Anteil von 7 % und 2050 einen Anteil von 22 % an der inländischen Stromerzeugung. Bezogen auf die fossile Stromerzeugung liegt der CCS-Anteil 2030 bei rund 15 % und 2050 bei etwa 80 %. In den Zielszenarien der Studie, die im Vorfeld der Erstellung des Energiekonzepts der Bundesregierung erstellt wurden (BMWi 2010), beträgt der CCS-Anteil an der gesamten Stromerzeugung (an der fossilen Stromerzeugung) in 2030 ca. 1 bis 2 % (5 %) und in 2050 rund 8 % (knapp 50 %).

Die Umsetzung der CCS-Technologie ist mit hohen infrastrukturellen Anforderungen verbunden und erfordert einen entsprechenden Vorlauf (Viebahn et al. 2010). Auf Bundesebene wurde Mitte 2012 ein CCS-Gesetz beschlossen, dass zunächst nur die Speicherung von im Vergleich zu den gesamten Emissionen der fossilen Stromerzeugung (bundesweit derzeit rund 300 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr) geringen Volumina (maximal 4 Mio. Tonnen pro Jahr) zulässt und daher häufig auch als Demonstrationsgesetz bezeichnet wird. Dagegen lehnen gerade diejenigen Bundesländer, die über

entsprechende Speicherpotenziale verfügen (z. B. Schleswig-Holstein) eine Einlagerung von CO<sub>2</sub> auf ihrem Territorium massiv ab. Nordrhein-Westfalen selber verfügt über kaum nennenswerte Speichermöglichkeiten. Auf Europäischer Ebene regelt eine entsprechende Richtlinie den Umgang mit CCS und es sind erhebliche Fördermittelmittel für die Erprobung von CCS reserviert worden. Bisher hängen die europaweit geplanten Projekte aber deutlich hinter den ursprünglichen Erwartungen zurück oder sind sogar, wie die beiden deutschen Projekte (von RWE und Vattenfall), zwischenzeitlich gestoppt worden. Zum aktuellen Stand der Umsetzung von CCS siehe u.a. von Hirschhausen et al. (2012).

Wird dennoch angenommen, dass die CCS- bzw. CCU-Option in NRW in den nächsten Jahrzehnten im Kraftwerksbereich eine Rolle spielen wird, so wird im Folgenden das mögliche spezifische CO<sub>2</sub>-Minderungspotenzial abgeschätzt: Dafür wird unterstellt, dass bis 2030 5 % der fossilen Stromerzeugung in NRW in Kraftwerken mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung erfolgen können, und dieser Anteil bis 2050 auf 80 % ansteigt<sup>7</sup>. Wird zudem angenommen, dass der derzeitige fossile Energieträgermix (s. Abschnitt 3) beibehalten wird, der CCS- bzw. CCU-Einsatz proportional in allen Arten fossiler Kraftwerke (Braunkohle, Steinkohle und Erdgas) zum Einsatz kommt, für den Wirkungsgrad der konventionellen Kraftwerke der derzeitige „Stand der Technik“ (UBA 2009b) herangezogen wird und für die CCS- bzw. CCU-Kraftwerke ein Wirkungsgradverlust gegenüber den konventionellen Kraftwerken von 10 % (entsprechend 4 bis 6 Prozentpunkte) angenommen wird, so ergibt sich im Jahr 2030 – ceteris paribus – eine Minderung der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen der fossilen Stromerzeugung von 4 % (bei einer Abscheiderate von 90 %) bzw. 4,5 % (bei einer Abscheiderate von 99 %) und 2050 eine Minderung von 70 % bzw. 78 %.

**Tabelle 3: Mögliche Reduktion der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen fossiler Stromerzeugung in NRW infolge des Einsatzes von CCS- bzw. CCU-Technologien**

<b>Minderungsbezug</b>	<b>Minderung in 2030</b>	<b>Minderung in 2050</b>
Spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen der fossilen Stromerzeugung nachzeitigem „Stand der Technik“, ohne Einsatz von CCS bzw. CCU	ca. 4 bis 5 %	ca. 70 bis 80 %

<sup>7</sup> Einige der derzeitigen Standorte von Kohlekraftwerken in NRW eignen sich aufgrund der hohen Dichte an großen Kraftwerken für den CCS-/CCU-Einsatz prinzipiell besonders gut, um die Kosten der Pipeline-Infrastruktur in Grenzen zu halten. Aus logistischen aber auch ökonomischen Gründen sind hingegen Standorte mit einzelnen, kleinen Kraftwerken weniger gut geeignet. Die hier unterstellte Umsetzung der CCS-Technologie kann dabei im Einzelfall durch den Neubau entsprechender Anlagen erfolgen oder aber durch die Nachrüstung bestehender Kraftwerke.

#### **4.1.6. Verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien für die Strom- und Wärmeherzeugung**

In dem weiteren dynamischen Ausbau von Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien wird in den nächsten Jahren und Jahrzehnten allgemein die wichtigste Option zur Reduktion von THG-Emissionen des Umwandlungssektors gesehen.

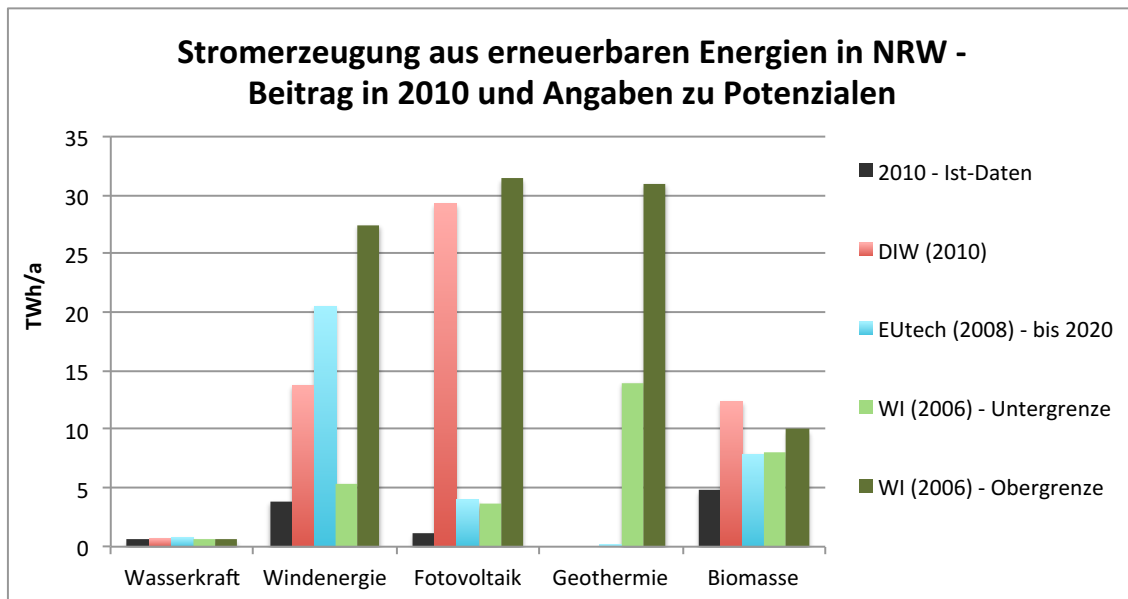
Während im Jahr 2011 in Deutschland 123 TWh Strom aus erneuerbaren Energien erzeugt und erneuerbare Energien damit 20 % der gesamten Stromerzeugung eingenommen haben, wird für die nächsten Jahre und Jahrzehnte in verschiedenen Szenarien für Deutschland (z. B. BMU 2012; BMWi 2010, 2011; SRU 2011; WWF 2009) insbesondere im Ausbau der Windenergie (sowohl an Land, vor allem aber auf dem Meer) hohes Potenzial für zusätzliche erneuerbare Stromerzeugung gesehen. Auch die Stromerzeugung aus Fotovoltaik, deren Wachstum in den vergangenen Jahren allgemein unterschätzt wurde, wird den Szenarien zufolge in Zukunft stärker zur Stromerzeugung beitragen. Nach 2030 werden in mehreren Szenarien auch die Stromerzeugung aus Geothermie sowie der Import von erneuerbar erzeugtem Strom als wichtige Optionen gesehen. In den meisten Szenarien erreichen die erneuerbaren Energien in 2030 Anteile an der Bruttostromerzeugung von rund 50 bis 65 % und in 2050 Anteile von 90 bis 100 %.

Bundesländerscharfe Analysen liefern die genannten Studien nicht, allerdings bedingen die hohen Anteile erneuerbarer Energien in der Stromversorgung, dass für die Realisierung der Szenarien auch die Stromerzeugung in NRW bis spätestens 2050 vollständig oder nahezu vollständig direkt durch heimische Erzeugung oder indirekt durch Importe auf erneuerbare Energien umgestellt werden müsste. Vergleichbare Studien zur möglichen Entwicklung der Stromerzeugung im Land NRW vor dem Hintergrund ambitionierter Klimaschutzziele liegen – mit einem entsprechend langem Betrachtungshorizont – nicht vor.

Für die Einschätzung der Potenziale kann jedoch auf eine vier Jahre alte Studie von EUTech (2008) zurückgegriffen werden, die das bis zum Jahr 2020 realisierbare Potenzial der erneuerbaren Energien zur Strom- und Wärmeherzeugung in NRW abgeschätzt hat. Zudem gibt es weitere Studien (DIW 2010; WI 2006), die das grundsätzliche Potenzial für die nordrhein-westfälische Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (grob) abschätzen. Die folgende Abbildung fasst die Ergebnisse dieser Studien in Bezug auf die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien zusammen und vergleicht diese mit der tatsächlichen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in NRW im Jahr 2010.



**Abbildung 1: Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in NRW im Jahr 2010 und mögliche zukünftige Erzeugung nach verschiedenen Szenarien bzw. Potenzialstudien**



*Quelle: Eigene Darstellung nach MKULNV (2011) und den zitierten Szenariostudien.*

Im Jahr 2010 wurden in NRW insgesamt 11 TWh Strom aus erneuerbaren Energien erzeugt, wobei der Großteil auf Biomasse (5 TWh) und Windenergie (4 TWh) entfiel. Nach Einschätzung der EUTech-Studie könnte der Beitrag der erneuerbaren Energien bis 2020 auf 33 TWh verdreifacht werden. Der größte zusätzliche Beitrag könnte von der Windenergie kommen. Die knapp 21 TWh Windstromproduktion würden – bei konstantem Stromverbrauch auf dem Niveau des Jahres 2010 – gerade noch ausreichen, um das Ziel der Landesregierung zu erfüllen, bis zum Jahr 2020 mindestens 15 % des Strombedarfs in NRW aus eigener Windstromerzeugung zu decken. Weitere realisierbare Potenziale sieht die EUTech-Studie bis 2020 insbesondere bei der Fotovoltaik und der Biomassenutzung. Die zusätzlichen Potenziale der Wasserkraft werden hingegen als sehr gering eingeschätzt<sup>8</sup> und die Potenziale der Geothermie gelten allgemein als (noch) zu teuer, um sie in absehbarer Zeit erschließen zu können. Aufgrund der geologischen Voraussetzungen in NRW kommt hier auch nur die Tiefengeothermie (z. B. im Rahmen des Hot Dry Rock-Verfahrens) in Frage.

Die aus DIW (2010) abgeleiteten Potenzial-Abschätzungen sehen für NRW ein längerfristiges Potenzial für die Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien von mindestens<sup>9</sup> 56 TWh vor, während eine ältere Studie des Wuppertal Institut (2006) als Potenzialobergrenze eine Erzeugung von 101 TWh sieht. Letzteres entspräche einem

<sup>8</sup> Dies bestätigt auch eine Studie von Anderer et al. (2007), die ein zusätzliches technisch-ökonomisch-ökologisches Potenzial für die Wasserkraftnutzung in NRW in Höhe von lediglich 0,07 TWh/a sieht.

<sup>9</sup> Das Wort „mindestens“ bezieht sich darauf, dass diese Studie nicht die Stromerzeugung aus Geothermie thematisiert.

Anteil von 73 % an dem derzeitigen (Jahr 2010) Strombedarf in NRW, wobei hier nicht nur eine offensive „Repowering“-Strategie bei der Windenergie unterstellt worden ist, sondern auch die technischen Potenziale der Tiefengeothermie weitgehend mit einbezogen worden sind (ohne Geothermie ergibt sich ein Deckungsanteil von etwa 50 %). Dabei ist zu betonen, dass beiden Potenzialabschätzungen keine detaillierten NRW-spezifischen Untersuchungen zu Grunde liegen und dass die technische Fortentwicklung der letzten Jahre, wie auch die aktuellen Rahmenbedingungen für den Ausbau der verschiedenen Technologien (insbesondere in Bezug auf die Windenergie und den im vergangenen Jahr überarbeiteten Windenergieerlass), in diesen Zahlen nicht berücksichtigt sind.

Eine aktuelle Potenzialstudie des Regionalverband Ruhr (2012) ermittelt das Potenzial der Stromerzeugung aus PV-Anlagen im Ruhrgebiet. Demnach beträgt das Fotovoltaik-Potenzial in dieser Region alleine für Dachflächen mindestens 6 und bis zu knapp 16 TWh/a und für Freiflächenanlagen weitere 7 bis 13 TWh/a. Daraus folgert die Studie, dass bezüglich des Haushaltsstroms mindestens knapp 3,5 Millionen der zurzeit 5,15 Millionen Einwohner des Ruhrgebiets mit Solarstrom von (20 % der gesamten verfügbaren) Gebäudedachflächen versorgt werden könnten. Für die verbleibenden knapp 2 Millionen Einwohner würden ca. 30 % der Gunstflächen gemäß EEG 2012 (ohne Naturschutzgebiete) reichen, um auch ihre Stromversorgung (bilanziell) mittels PV-Anlagen zu sichern.

Derzeit werden im Auftrag der nordrheinwestfälischen Landesregierung durch das LANUV Potenzialstudien für die Nutzung der erneuerbaren Energien (Solar, Wind, Biomasse, Geothermie, Wasser) in NRW erstellt, die Ende dieses Jahres bzw. Anfang nächsten Jahres fertiggestellt und veröffentlicht werden. Die in diesen Studien enthaltenen aktuellen und detaillierten Daten zu den Ausbaupotenzialen der verschiedenen erneuerbaren Energieträgern werden eine wichtige Grundlage für die kommenden Diskussionen um den zukünftigen Umbau des nordrheinwestfälischen Strom- und Wärmesektors liefern.

Im Gegensatz zur dezentralen Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser, ist das Potenzial zur Nutzung erneuerbarer Energien für die Fernwärmeerzeugung limitiert. Prinzipiell kann Fernwärme in Biomasse-Heiz(kraft)werken bereitgestellt werden, dafür müsste die Biomasse aber in relativ großen und siedlungsnahen Anlagen genutzt werden, was auf logistische Grenzen stößt<sup>10</sup>. Optionen ergeben sich allerdings durch die Mitverbrennung von Biomasse (Teilsubstitution des bisherigen Brennstoffes). Heute schon etabliert ist die Nutzung von Abfallstoffen in Heizkraftwerken, wobei bezüglich

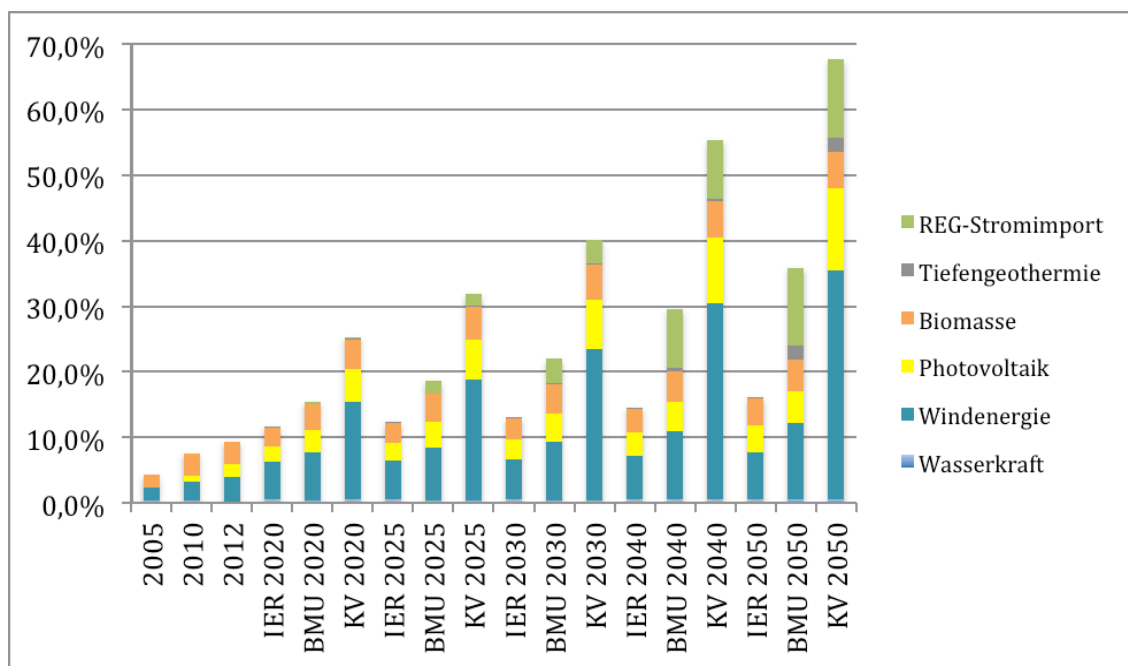
---

<sup>10</sup> Zur Vermeidung von Transporten und zur Stärkung des ländlichen Raumes wird Biomasse heute bisher möglichst nah am Ort seiner Gewinnung – also zumeist fernab von hoher Siedlungsdichte – genutzt.

der Mengenverfügbarkeit die Auswirkungen gesetzlicher Veränderungen auf der Abfallseite zu berücksichtigen sind. Perspektivisch könnte die Nutzung von Tiefen-Geothermie in NRW einen gewissen Beitrag zur Fernwärmeerzeugung leisten.

Unter Rückgriff auf die erwähnten bundesdeutschen und NRW-spezifischen Studien zum Ausbau erneuerbarer Energien in den kommenden Jahrzehnten, können aus heutiger Sicht verschiedene grundsätzlich – unter spezifischen Voraussetzungen – als plausibel einzuschätzende Ausbaupfade für NRW (Entwicklung der Anteile der verschiedenen erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung in NRW) abgeleitet werden. Diese Abschätzungen sind als Input für die Diskussion mit den Mitgliedern der Arbeitsgruppe zu verstehen und müssen zudem mit den Erkenntnissen der in Arbeit befindlichen NRW-spezifischen Potenzialstudien des LANUV noch abgeglichen werden.

**Abbildung 2: Mögliche Beiträge erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung innerhalb von NRW in % (Annahme: Strombedarf in NRW verbleibt etwa auf konstantem Niveau)**



Im Zuge des Ausbaus der erneuerbaren Energien im Stromsystem ist ein besonderes Augenmerk auf die Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit und Systemstabilität zu legen.

#### 4.1.7. Minderungen des Strom- und Wärmebedarfs beim Endverbrauch

Eine weitere Option zur Verringerung der durch den Umwandlungssektor verursachten THG-Emissionen liegt in einer Minderung der Endverbrauchernachfrage nach Strom und Wärme. Die Akteure des Umwandlungssektors können auf diese Minderungsoption mehr oder weniger direkt einwirken. Möglich ist z. B. die Durchführung oder Unterstüt-

zung von Informationskampagnen zur Energieeinsparung oder auch die Ausweitung der Geschäftstätigkeit auf das so genannte „Energie-Contracting“, bei dem Energieversorger von der Erschließung von Energieeinsparpotenziale bei Kundinnen und Kunden profitieren können. Dabei können Unternehmen prinzipiell nicht nur von der Durchführung von Energiesparmaßnahmen profitieren, sondern zusätzlich (und ggf. mit Synergieeffekten) auch durch Maßnahmen, die es den Verbraucherinnen und Verbrauchern erleichtern, einen Teil ihre Stromnachfrage von Zeiten hoher Strompreise zu Zeiten niedrigerer Strompreise zu verlagern (Demand Side Management als Geschäftsfeld).

Die Bundesregierung hat das Ziel formuliert, die Stromnachfrage in Deutschland gegenüber 2008 bis 2020 um 10 % und bis 2050 um 25 % zu reduzieren. Beim Wärmebedarf sind noch deutlich weitergehende Einsparungen möglich.

Die Möglichkeiten für entsprechende Einsparungen werden in den einzelnen Sektoren (Industrie, Private Haushalte, GHD) diskutiert.

## **4.2. Produzierendes Gewerbe/Industrie**

### **4.2.1. Einleitung**

Im Folgenden werden mögliche Treibhausgasminderungspfade bis zum Jahr 2050 für die Industrie in NRW diskutiert. Dabei werden vier grundsätzliche Minderungsoptionen unterschieden:

- Reduktion des Endenergiebedarfs nach Industriebranchen
- Energieträgerwechsel hin zu Energieträgern mit geringerem CO<sub>2</sub>-Ausstoß
- Prozessänderungen und CCS/CCU-Einsatz zur Reduktion der prozessbedingten Emissionen
- Änderungen in der Nachfrage nach Zwischen- und Endprodukten

Abschließend wird auf Grundlage der Einschätzungen zu diesen Minderungsoptionen ein möglicher Minderungspfad für den gesamten Industriesektor in NRW abgeleitet.

### **4.2.2. Reduktion des Endenergiebedarfs nach Industriebranchen**

Die Reduktion des Endenergiebedarfs im Produzierenden Gewerbe und der Industrie kann grundsätzlich über mehrere Wege erfolgen:

- Steigerung der Energieeffizienz von technischen Geräten<sup>11</sup>
- Erhöhung der Material-/Ressourceneffizienz bzw. (verstärktes) Recycling
- Ausschöpfung branchenübergreifender Synergieeffekte

Die in diesem Abschnitt diskutierte mögliche Senkung des spezifischen und gesamten Endenergiebedarfs in den verschiedenen Industriebranchen berücksichtigt alle diese verschiedenen Wege und basiert auf verschiedenen Szenariostudien für Deutschland.<sup>12</sup> In Bezug auf die Ableitung des jeweiligen branchenspezifischen Einsparpotenzials in NRW liegen keine Informationen vor, die nahe legen, dass sich die Produktionstechnik der Branchen in NRW wesentlich von der entsprechenden Technik im restlichen Bundesgebiet unterscheidet. Folglich werden die in den Szenarien beschriebenen Einsparmöglichkeiten im Zeitverlauf proportional auf NRW übertragen.<sup>13</sup> Allerdings werden Minderungsoptionen in den hier ausgewählten Branchen mit nordrheinwestfälischen Industrievertretern bis Ende 2012 diskutiert, um diese Annahme zu überprüfen und ggf. Anpassungen der Potenzialabschätzung vorzunehmen. Dazu werden branchenspezifische Analysen ausgearbeitet, die tiefer ins Detail gehen als es im Rahmen dieser sektorübergreifenden Potenzialanalyse möglich ist.

#### 4.2.2.1 *Nicht-Eisenindustrie*

In der Nicht-Eisenindustrie dominieren Strom und Erdgas den Endenergieverbrauch (IT.NRW 2011), der in NRW besonders von der Aluminiumherstellung geprägt ist. Aufgrund des hohen Strom-Anteils spiegeln sich Energieeinsparungen zu einem großen Teil nicht in Rückgängen der direkten THG-Emissionen der Branche wieder, sondern führen indirekt zu niedrigeren Emissionen im Umwandlungssektor.

In zwei verschiedenen Szenariostudien aus dem Jahr 2009 (UBA 2009b; WWF 2009) werden in der Branche der Nicht-Eisenindustrie spezifische Reduktionen des Endenergieverbrauchs in Höhe von 40 bis 50 % bis 2030 (gegenüber 2005) beschrieben. Brennstoff- und Strombedarf sinken dabei in den Szenarien jeweils in ähnlichem Umfang. In dem Klimaschutzszenario der WWF-Studie, die im Gegensatz zur UBA-Studie über das Jahr 2030 hinausblickt, findet nach 2030 nur noch ein moderater Rückgang des spezifischen Endenergiebedarfs statt.

---

<sup>11</sup> Dies kann auch über eine Änderung des verwendeten Energieträgers erzielt werden, was beispielsweise häufig der Fall ist, wenn von einem Brennstoffeinsatz zu einem Einsatz von Strom gewechselt wird.

<sup>12</sup> Weitere Abschätzungen der Energie- und THG-Minderungsmöglichkeiten innerhalb verschiedener Industriebranchen in Deutschland finden sich in einer aktuellen Studie von Fraunhofer ISI et al. (2011). Die Erkenntnisse dieser Studie fließen in die detaillierten, NRW-spezifischen Branchen-Analysen ein, die derzeit im Rahmen der AG erstellt werden.

<sup>13</sup> So auch das Vorgehen des LANUV NRW (2012a) in Bezug auf die Eisen- und Stahlindustrie.

Eine Studie von McKinsey Deutschland (2007a) untersucht speziell Möglichkeiten zur Reduktion der Treibhausgase einzelner Industriebranchen. Für die Nicht-Eisenindustrie wird bis 2030 in einem „Stand der Technik“-Szenario unter der Annahme einer jährlichen Steigerung des Produktionsvolumens von 1 % mit einem Anstieg der (direkten plus indirekten) THG-Emissionen von 15 Mt CO<sub>2</sub>e in 2004 auf 18 Mt CO<sub>2</sub>e in 2030 gerechnet. Der Studie zufolge kann dieser Anstieg bei einer Umsetzung von wirtschaftlichen Maßnahmen – und einem angenommenen CO<sub>2</sub>-Preis von 20 Euro/Tonne lediglich um rund 1 Mt CO<sub>2</sub>e reduziert werden. Teurere Vermeidungsoptionen (bis etwa 100 Euro/Tonne) ließen bis 2030 eine weitere Tonne einsparen. Werden auf Grundlage der Daten innerhalb der Studie die spezifischen THG-Emissionen abgeleitet (wird also der Produktionsanstieg herausgerechnet), so ergibt sich eine Reduktion von 11 % bis 2020 und 16 % bis 2030 (jeweils gegenüber 2004). Da die Studie „als Folge des Ausstiegs aus der Kernenergie“ eine steigende CO<sub>2</sub>-Intensität der Stromerzeugung unterstellt, werden offenbar etwas stärkere Rückgänge des Endenergieverbrauchs angenommen.

Dennoch rechnet die McKinsey-Studie offensichtlich mit einem deutlich niedrigeren realisierbaren Energieeinsparvolumen in der Nicht-Eisenbranche als die zwei anderen genannten Studien (UBA 2009b; WWF 2009). Die genauen Gründe für diese Unterschiede können nicht identifiziert werden, da die beiden letztgenannten Studien nicht auf die angenommenen (technisch-organisatorischen) Änderungen in den Herstellungsprozessen eingehen. Offensichtlich werden hier optimistischere Annahmen zur technisch-wirtschaftlichen Entwicklung hocheffizienter Produktionstechnologien getroffen. Die McKinsey-Studie beschreibt „graduelle“ Effizienzverbesserungen bei heute bereits weitgehend ausgereiften Technologien (bei elektrischen Antriebssystemen, bei der Elektrolyse und bei Schmelzaggregaten bzw. bei der Wärmebehandlung).<sup>14</sup>

Gerade bei der Aluminiumelektrolyse sind technologische Sprünge in den nächsten Jahrzehnten vorstellbar. So könnten inerte Anoden, welche während des Elektrolyseprozesses nicht verbraucht werden, sowie Kathoden aus benetzbaren Materialien (z. B. Titandiborid) den Energieverbrauch um 20-25 % senken. Zudem würde der Energieaufwand zur Anodenproduktion minimiert werden. Als mögliche Alternative zur Aluminiumelektrolyse nennt Fraunhofer ISI (2010) den carbothermischen Prozess, mit welchem sich Stromeinsparungen von 20-30 % realisieren lassen. Ob und wann diese neuen Technologien in der Aluminiumelektrolyse allerdings (zu vertretbaren Kosten) zur Verfügung stehen werden, lässt sich aus heutiger Sicht nicht abschätzen.

---

<sup>14</sup> Allerdings ist in diesem Zusammenhang auch darauf hinzuweisen, dass sich die Szenariostudien des WWF (2009) und des UBA (2009b) bei den Angaben von Entwicklungen des spezifischen Endenergieverbrauchs auf die Bruttowertschöpfung (BWS) beziehen und daher die jeweiligen Annahmen über die Entwicklung der BWS im Verhältnis zur physischen Erzeugungsmenge einen Faktor darstellen, der bereits zu gewissen Unterschieden zwischen den Angaben in den Szenarien führen kann.

Auf Grundlage der genannten Literatur (insbesondere McKinsey Deutschland 2007a; UBA 2009b; WWF 2009) lassen sich Einsparpotenziale beim spezifischen Endenergieverbrauch gegenüber 2005 in der Nicht-Eisenindustrie in NRW in Höhe von etwa 20 bis 40 % bis 2030 und 30 bis 50 % bis 2050 ableiten. Wird ein in Zukunft konstantes Produktionsvolumen unterstellt, so ergeben sich analoge Reduktionen für die gesamte Endenergienachfrage. Wird hingegen z. B. angenommen, dass es zu einem Produktionswachstum von jährlich 1 % bis 2030 (so die Annahme in McKinsey Deutschland 2007b<sup>15</sup>) und 0,5 % nach 2030 kommt, so würde der gesamte Endenergiebedarf gegenüber 2005 um etwa 2 bis 27 % bis 2030 und 6 bis 33 % bis 2050 sinken. Ob eher die untere oder obere Reduktion erreicht werden kann, wird in wesentlichem Maße von der technologischen Entwicklung abhängen, die (in Grenzen) über Forschung und Entwicklung auch politisch beeinflusst werden kann.

#### 4.2.2.2 Eisen- und Stahlindustrie

Die Eisen- und Stahlindustrie weist in NRW – jeweils hinter der Chemiebranche – den zweitgrößten Endenergiebedarf und die zweithöchsten THG-Emissionen aller Industriebranchen auf (IT.NRW 2011). Aufgrund des hohen Steinkohle- und Erdgasanteils am Endenergieverbrauch ist der Anteil der direkten Emissionen an den gesamten verursachten Emissionen sehr hoch.

In drei Szenariostudien werden zukünftige Reduktionspfade des spezifischen Endenergiebedarfs beschrieben. In zwei Fällen (EnBW et al. 2009; WWF 2009) verläuft dieser Reduktionspfad ähnlich. Hier kommt es – in den jeweils ambitioniertesten Klimaschutzszenarien der Studien – zu Rückgängen des spezifischen Endenergiebedarfs von etwa 20 bis 25 % bis 2030 und von etwa 25 bis 30 % bis 2050 (jeweils gegenüber 2005). Die Studie des UBA (2009b) beschreibt hingegen einen wesentlich stärkeren Rückgang von etwas über 50 % bereits bis 2030. Über die Gründe für diese deutlich unterschiedliche Einschätzung können aufgrund fehlender bzw. unzureichender Annahmen in Bezug auf die Ursachen für die Effizienzverbesserungen keine gesicherten Aussagen gemacht werden.

In der Studie von McKinsey Deutschland (2007b) wird eine leichte Produktionssteigerung in der Branche bis 2030 in Höhe von 0,2 % pro Jahr angenommen. Durch Effizienzmaßnahmen (also ohne an dieser Stelle die weiteren quantifizierten Maßnahmen „CCS“ und „Wechsel von Brennstoffen zu Strom“ zu berücksichtigen) kann der Treibhausgasausstoß bis 2030 trotz moderat ansteigendem Produktionsvolumen etwa auf konstantem Niveau gehalten werden, was einem Rückgang der spezifischen THG-

---

<sup>15</sup> In UBA (2009b) wird hingegen – basierend auf Abschätzungen von Fraunhofer ISI – bis 2030 für Deutschland eine Abnahme der Aluminiumerzeugung (als Summe der Primär- und Sekundärerzeugung) und eine konstante Kupferherstellung angenommen.

Emissionen zwischen 2004 und 2030 um ca. 5 % entspricht. Erneut ist darauf hinzuweisen, dass die McKinsey-Studie in diesem Zeitraum eine steigende CO<sub>2</sub>-Intensität der deutschen Stromerzeugung unterstellt, so dass die spezifische Reduktion des Endenergiebedarfs vermutlich etwas stärker als 5 % ausfällt.

Generell ist anzumerken, dass durch die langen Laufzeiten der Anlagen der Eisen- und Stahlindustrie von bis zu 40 Jahren eine hohe Pfadabhängigkeit und Kapitalintensität gegeben ist. Daher lassen sich inkrementelle Effizienzverbesserungen einfacher realisieren als radikale Neuerungen.

Auf Grundlage der genannten Literatur (insbesondere EnBW et al. 2009; UBA 2009b; WWF 2009 und McKinsey Deutschland 2007b) lassen sich Einsparpotenziale beim spezifischen Endenergieverbrauch gegenüber 2005 in der Eisen- und Stahlindustrie in NRW in Höhe von etwa 10 bis 25 % bis 2030 und 20 bis 30 % bis 2050 ableiten. Wird ein in Zukunft konstantes Produktionsvolumen unterstellt, so ergeben sich analoge Reduktionen für die gesamte Endenergienachfrage.

#### 4.2.2.3 *Chemieindustrie*

Die Grundstoff- und sonstige Chemieindustrie ist in NRW diejenige Industriebranche mit dem höchsten Endenergiebedarf und den höchsten THG-Emissionen. Fernwärme, Strom und Erdgas sind hier die dominierenden Energieträger (IT.NRW 2011).

Nach verschiedenen Szenariostudien (EnBW et al. 2009; UBA 2009b; WWF 2009) sind gegenüber 2005 Rückgänge im spezifischen Endenergiebedarf der Grundstoff- und sonstigen Chemieindustrie von etwa 20 bis 40 % bis 2030 und von etwa 40 bis 50 % bis 2050 realisierbar. Der Brennstoffbedarf kann dabei gegenüber dem Strombedarf nach WWF (2009) und EnBW et al. (2009) etwas überproportional reduziert werden.

Die Studie von McKinsey Deutschland (2007b) nimmt eine deutliche Produktionssteigerung in der Grundstoff- und sonstigen Chemieindustrie in Höhe von 1,8 % bis 2030 an. Durch verschiedene Maßnahmen zur THG-Reduktion könnte demnach jedoch der THG-Ausstoß gegenüber 2004 (62 Mio. Tonnen) bis 2030 (61 Mio. Tonnen) praktisch konstant gehalten werden. Nur zum Teil wird dies jedoch durch Energieeffizienzmaßnahmen erreicht, auch der angenommene Einsatz von CCS und Änderungen in der Produktion zur Senkung der Prozessemissionen spielen eine Rolle. Alleine die Energieeffizienzmaßnahmen führen jedoch zu einem Rückgang der spezifischen THG-Emissionen um rund 25 bis 30 % bis 2030 (gegenüber 2004), was innerhalb der Spannbreite der oben genannten Szenariostudien liegt.

Auf Grundlage der Literatur (insbesondere EnBW et al. 2009; UBA 2009b; WWF 2009 und McKinsey Deutschland 2007b) lassen sich Einsparpotenziale beim spezifischen



Endenergieverbrauch gegenüber 2005 in der Grundstoff- und sonstigen Chemieindustrie in NRW in Höhe von etwa 20 bis 40 % bis 2030 und 40 bis 50 % bis 2050 ableiten. Wird ein in Zukunft konstantes Produktionsvolumen unterstellt, so ergeben sich analoge Reduktionen für die gesamte Endenergienachfrage. Wird hingegen z. B. angenommen, dass es zu einem Produktionswachstum von jährlich 1,8 % bis 2030 (so die Annahme in McKinsey Deutschland 2007b) und 1 % nach 2030 kommt, so würde sich der gesamte Endenergiebedarf gegenüber 2005 bis 2030 um etwa +25 % bis -6 % verändern und bis 2050 um rund +14 bis -5 %.

#### 4.2.2.4 Zementindustrie

Etwa 10 % der direkten THG-Emissionen der Industrie in NRW wird durch die Zementindustrie verursacht LANUV NRW (2012b). Mit rund 90 % dominieren in der Zementindustrie diese direkten Emissionen. Sie entstehen vor allem bei der Herstellung von Zementklinker. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen sind dabei überwiegend prozessbedingt durch die Abspaltung von CO<sub>2</sub> aus dem Rohstoff Kalkstein (Kalzinierung). Insgesamt sind etwa 2/3 der CO<sub>2</sub>-Emissionen der deutschen Zementwerke auf diesen Prozess zurückzuführen. Das verbleibende Drittel der direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen entsteht als energiebedingte Emissionen aus dem Einsatz von Brennstoffen zur Prozesswärmeerzeugung (LANUV NRW 2012b; McKinsey Deutschland 2007a).

Verbesserungen der Energieeffizienz spielen nach McKinsey Deutschland (2007a) eine untergeordnete Rolle bei der zukünftigen Senkung der THG-Emissionen der Zementindustrie. Wichtige Optionen sind hingegen die Reduktion der prozessbedingten Emissionen durch eine Minderung des Klinkeranteils, Brennstoffsubstitution und mittel- bis langfristig der Einsatz von CCS. Aus den Angaben der Studie von McKinsey Deutschland (2007a) lässt sich jedoch ableiten, dass der spezifische Energiebedarf durch Effizienzmaßnahmen bis 2030 (gegenüber 2004) um etwa 10 bis 15 % sinkt. Die Studie erwartet – ähnlich wie EnBW et al. (2009) – einen moderaten Anstieg der Zementproduktion um knapp über 0,2 % pro Jahr, so dass der absolute Rückgang der Emissionen dieser Branche geringer ausfällt als der spezifische Rückgang.

Es liegen auch für diese Branche keine Informationen vor, die gegen eine Übertragung dieser Einschätzungen auf NRW sprechen.

#### 4.2.2.5 Glas- und Keramikindustrie

In der Glas- und Keramikindustrie beschreiben zwei Klimaschuttszenarien (EnBW et al. 2009; WWF 2009) Rückgänge des spezifischen Endenergiebedarfs gegenüber 2005 von 20 bis 40 % bis 2030 und von 25 bis 45 % bis 2050. Neben unterschiedlichen Einschätzungen zu zukünftigen Effizienzsteigerungen wird auch das Verhältnis zwischen Brennstoff- und Strombedarf unterschiedlich eingeschätzt. Im Szenario der

WWF-Studie wird der spezifische Bedarf nach beiden Energieträgerarten in etwa in gleichem Umfang reduziert, während im Szenario der Studie von EnBW u. a. der spezifische Brennstoffbedarf deutlich stärker reduziert wird als der spezifische Strombedarf.

Nach EnBW et al. (2009) steigt die Glas- und Glaswarenproduktion zwischen 2005 und 2030 um jährlich durchschnittlich 1,3 % und zwischen 2030 und 2050 um jährlich durchschnittlich 0,4 %.

Es liegen auch für diese Branche keine Informationen vor, die gegen eine Übertragung dieser Einschätzungen auf NRW sprechen.

#### 4.2.2.6 *Papierindustrie*

Die Papierindustrie verursacht rund 3 % der direkten THG-Emissionen der Industrie in NRW. Der Endenergiebedarf wird dabei von Strom und Erdgas dominiert. In den Klimaschutzszenarien in EnBW et al. (2009) und WWF (2009) wird der spezifische Endenergiebedarf in der Papierindustrie gegenüber 2005 um 10% bis 30 % bis 2030 und um 15 bis 40 % bis 2050 reduziert. Auf Grundlage der Angaben in McKinsey Deutschland (2007a) lässt sich dort gegenüber 2004 eine Verbesserung der spezifischen Energieeffizienz bis 2030 um rund 30 % ableiten. In der Folge könnte der Anstieg der THG-Emissionen in diesem Sektor trotz einer in McKinsey Deutschland (2007a) angenommenen Produktionssteigerung um über 60 % (1,9 % pro Jahr) bis 2030 (gegenüber 2004) auf rund 13 % reduziert werden (von 15 Tonnen CO<sub>2</sub>e auf 17 Tonnen CO<sub>2</sub>e).<sup>16</sup>

#### 4.2.2.7 *Übrige Industriebranchen*

Der Energiebedarf in den übrigen Industriebranchen ist sehr heterogen und zudem werden diese Branchen in der vorliegenden Literatur unterschiedlich zusammengefasst, so dass allgemeine Aussagen zu den Einsparpotenzialen infolge von Verbesserungen der Energieeffizienz hier nicht möglich sind. In diesen übrigen Branchen haben industrielle Querschnittstechnologien jedoch zumeist einen großen Anteil am gesamten Endenergiebedarf, für die signifikante Einsparpotenziale (z. B. bei elektrischen Motoren) vielfach nachgewiesen sind.

---

<sup>16</sup> Neben den Effizienzmaßnahmen sieht McKinsey Deutschland (2007a) keine weiteren THG-Vermeidungsoptionen in der Papierindustrie.

#### 4.2.2.8 Zusammenfassung

Aus der zuvor diskutierten Literatur können die in Tabelle 1 aufgeführten Verbesserungen des spezifischen Endenergiebedarfs in den unterschiedlichen Industriebranchen in NRW für 2030 bzw. 2050 abgeleitet werden. Dabei werden die aus der Literatur entnommenen Minderungsspannen analog auf NRW übertragen, da keine Hinweise für eine in NRW abweichende Technologie-Struktur vorliegen.

**Tabelle 2: Mögliche Reduktion des spezifischen Endenergiebedarfs verschiedener Industriebranchen in NRW**

<b>Branche</b>	<b>Minderungsbezug</b>	<b>Minderung in 2030</b>	<b>Minderung in 2050</b>
Nicht-Eisenindustrie	Spezifischer Endenergiebedarf in der jeweiligen Branche im Jahr 2005	ca. 20 bis 40 %	ca. 30 bis 50 %
Eisen- und Stahlindustrie		ca. 10 bis 25 %	ca. 20 bis 30 %
Chemieindustrie		ca. 20 bis 40 %	ca. 40 bis 50 %
Zementindustrie		ca. 10 bis 15 %	ca. 15 bis 25 %
Glas- und Keramikindustrie		ca. 20 bis 35 %	ca. 30 bis 40 %
Papierindustrie		ca. 10 bis 30 %	ca. 15 bis 40 %
<b>GESAMTE INDUSTRIE</b>		ca. 20 bis 35 %	ca. 30 bis 50 %

#### 4.2.3. Energieträgerwechsel hin zu Energieträgern mit geringerem CO<sub>2</sub>-Ausstoß

Nach McKinsey Deutschland (2007a) kann die Chemieindustrie ihre gesamten (direkten plus indirekten) CO<sub>2</sub>-Emissionen trotz eines heute bereits hohen Erdgasanteils am fossilen Energieträgermix durch eine Substitution des verbleibenden Mineralöl- und Kohleeinsatzes um 1 % (bis 2020) bzw. um 2 % (bis 2030) gegenüber einer Referenzentwicklung reduzieren. Die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten hierfür werden von McKinsey Deutschland (2007a) auf 30 bis 40 € pro Tonne CO<sub>2</sub> geschätzt. In der Zementindustrie werden durch Brennstoffsubstitution in der gleichen Studie ebenfalls entsprechende Reduktionen (1 % in 2020 und 2 % in 2030) für möglich gehalten, hier jedoch zu höheren Kosten (>50 € pro Tonne CO<sub>2</sub>).

Im Szenario „Innovation“ (WWF 2009) verschieben sich über den gesamten Industriesektor hinweg (keine branchenscharfen Angaben zum Energieträgermix) die Anteile der Energieträger am Bedarf nach fossilen Endenergieträgern deutlich: Der Anteil der Steinkohle sinkt von 21 % in 2005 auf 17 % in 2030 und 10 % in 2050 und der Anteil des Mineralöls sinkt von 11 % in 2005 auf 8 % in 2030 und 6 % in 2050, während der Anteil von Erdgas (und anderen fossilen Gasen) deutlich zunimmt, von 64 % in 2005 auf 71 % in 2030 und 80 % in 2050. Gegenüber unveränderten Anteilen im fossilen Energieträgermix könnten demnach durch eine solche Energieträgersubstitution die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2030 um etwa 3 % und bis 2050 um rund 8 % reduziert werden. Es wird hier angenommen, dass eine ähnliche Substitution analog für den Industriesektor in NRW denkbar ist und die realisierbaren Potenziale zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen entsprechend in ähnlicher Größenordnung liegen.

Aus der zuvor diskutierten Literatur können die in Tabelle 2 aufgeführten Emissionsminderungen infolge möglicher Energieträgerwechsel innerhalb der fossilen Energien in der Industrie in NRW für 2030 bzw. 2050 abgeleitet werden. Dabei werden die aus WWF (2009) entnommene Minderung analog auf NRW übertragen, da keine Hinweise für eine in NRW abweichende Energieträger- und Technologie-Struktur vorliegen.

**Tabelle 3: Mögliche Reduktion der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen der Industrie in NRW durch Energieträgerwechsel innerhalb der fossilen Energien**

<b>Branche</b>	<b>Minderungsbezug</b>	<b>Minderung in 2030</b>	<b>Minderung in 2050</b>
GESAMTE INDUSTRIE	Energiebedingte CO <sub>2</sub> -Emissionen bei konstantem Anteil der Energieträger	ca. 3 %	ca. 8 %

#### **4.2.4. Prozessänderungen und CCS-/CCU-Einsatz zur Reduktion der prozessbedingten Emissionen**

Prozessbedingte Emissionen, d. h. Emissionen, die als Nebenprodukt von chemischen Reaktionen entstehen, können entweder durch grundlegende Änderungen im Herstellungsprozess vermieden werden, oder ihr Entweichen in die Atmosphäre kann durch CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Speicherung (CCS) bzw. -Wiederverwendung (CCU) verhindert bzw. begrenzt werden.

In Abschnitt 4.2.4.1 werden grundlegende Änderungen im Herstellungsprozess diskutiert, während die Anwendung von CCS bzw. CCU im darauf folgenden Abschnitt 4.2.4.2 thematisiert wird.

#### 4.2.4.1. Prozessänderungen

In Bezug auf die prozessbedingten Emissionen bei der Herstellung von Ammoniak und Methanol wird in der Literatur (WWF 2009) auf die grundsätzlich vorhandene Möglichkeit hingewiesen, perspektivisch im Produktionsprozess von auf fossiler Basis erzeugtem Wasserstoff bzw. von Erdgas komplett auf regenerativ erzeugten Wasserstoff umzustellen. Im Klimaschutzszenario der WWF-Studie wird angenommen, dass dadurch die absoluten CO<sub>2</sub>-Emissionen der Ammoniak- sowie der Methanolherstellung in Deutschland gegenüber 2005 bis 2030 um jeweils rund 40 % und bis 2050 auf Null reduziert werden können.

Die N<sub>2</sub>O-Emissionen aus der Produktion von Salpetersäure und Adipinsäure können reduziert werden, indem die Rate der katalytischen Zersetzung des N<sub>2</sub>O weiter erhöht wird, von derzeit (nach McKinsey Deutschland 2007a) 85 bis 90 % auf rund 98 % bis spätestens 2020 (nach McKinsey Deutschland 2007a) bzw. auf rund 99,5 % ab 2025 (nach WWF 2009). Solch hohe Zersetzungsraten sind voraussichtlich nur durch eine Redundanz der entsprechenden Katalysatoren zu erreichen, so dass bei Ausfall eines Katalysators weiterhin die N<sub>2</sub>O-Emissionen mit einem zweiten Katalysator vermieden werden können. Sofern und sobald eine Zersetzungsrate von 99,5 % erreicht werden kann, würden sich die THG-Emissionen der Salpeter- und Adipinsäureproduktion gegenüber 2005 um rund 98 % reduzieren lassen.

In Bezug auf die prozessbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen der Glasherstellung wird in der gleichen Studie (WWF 2009) davon ausgegangen, dass durch höhere Mehrwegquoten und einen höheren Scherbeneinsatz die absoluten Emissionen gegenüber 2005 um rund 25 % bis 2030 und um 50 % bis 2050 verringert werden können.

Nach Fraunhofer ISI et al. (2011) lassen sich die prozessbedingten THG-Emissionen der Industrie in Deutschland bis 2035 (gegenüber 2007) wirtschaftlich um 38 % reduzieren, sofern derzeit noch vorhandene Marktbarrieren abgebaut werden. Bei Fortbestand der Barrieren wäre bis 2035 eine Reduktion um 25 % möglich.

Aus der zuvor diskutierten Literatur können die in Tabelle 4 aufgeführten Prozessemissionsminderungen infolge von Änderungen des Herstellungsprozesses in der Industrie in NRW für 2030 bzw. 2050 abgeleitet werden. Dabei werden die aus der Literatur entnommenen Minderungsspannen analog auf NRW übertragen, da keine Hinweise für eine in NRW abweichende Technologie-Struktur vorliegen.

**Tabelle 4: Mögliche Reduktion der THG-Prozessemissionen verschiedener Branchen in NRW durch Änderungen des Herstellungsprozesses (ohne CCS/CCU)**

Branche	Minderungsbezug	Minderung in 2030	Minderung in 2050
Chemieindustrie (Ammoniak und Methanol)	Prozessemissionen der jeweiligen Branche bzw. des jeweiligen Herstellungsprozesses im Jahr 2005	ca. 40 %	100 %
Chemieindustrie (Salpeter- und Adipinsäure)		ca. 70 bis 98 %	ca. 98 %
Glasindustrie		ca. 20 bis 30 %	ca. 50 %

Weitere Beispiele für Minderungen der prozessbedingten Emissionen sind Zement auf alternativer Basis (z. B. „Celitement“ oder „Novacem“) oder Stahlherstellung auf Basis von regenerativ hergestelltem Wasserstoff. Diese Beispiele mit jeweils hohen Minderungspotenzialen sind nicht in Tabelle 3 aufgenommen, da sie besonders weit von einem kommerziellen Einsatz entfernt scheinen. Sie sollten aber als Visionen mitgedacht werden.

#### 4.2.4.2. Anwendung von Carbon Capture and Storage (CCS) bzw. Carbon Capture and Use (CCU)<sup>17</sup>-Technologien

Die Autoren der Studie WWF (2009) schlagen vor, dass bezüglich der prozessbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen der Zement- und Kalk- sowie der Eisen- und Stahlindustrie „spätestens ab 2030 der Einsatz von CCS verbindlich vorgeschrieben“ [wird], wenn das Emissionshandelssystem bis dahin keine flächendeckende Durchsetzung dieser Technologie bewirkt.“ In dem Klimaschutzszenario der Studie werden durch den Einsatz von CCS die prozessbedingten Emissionen der Zement- und Kalkherstellung bis 2050 vollständig vermieden. Dies sei möglich, da „die Konzentration von CO<sub>2</sub> im Rauchgas eines Zement- oder Kalkofens viel höher ist als in einem Kohlekraftwerk. Deshalb ist der spezifische Energiebedarf für die Abscheidung und Verdichtung des CO<sub>2</sub> in diesen Prozessen relativ niedrig.“ Bis 2030 werden die CO<sub>2</sub> Emissionen aus der Zement- und Kalkherstellung gegenüber 2005 um 45 % reduziert, bis 2050 werden sie durch flächendeckende Nutzung von CCS auf null zurückgeführt. Die prozessbedingten

<sup>17</sup> Die Erforschung von Möglichkeiten der Nutzung bzw. Wiederverwertung von CO<sub>2</sub> ist von hoher Bedeutung und kann eine sinnvolle Alternative zur der Sequestrierung von CO<sub>2</sub> darstellen. Im Folgenden wird dennoch nur von „CCS“ die Rede sein, da die zitierten Studien nur dieses Verfahren nennen. Selbstverständlich ist dennoch in allen Fällen alternativ der Einsatz von CCU zu bevorzugen, sofern dieser technisch und wirtschaftlich möglich ist.

Emissionen der Eisen- und Stahlproduktion sinken gegenüber 2005 hingegen bis 2030 um rund 30 % und bis 2050 um 60 %.

Auch nach McKinsey Deutschland (2007a) ist der Einsatz von CCS-Technologie in der Industrie zur Reduktion der prozessbedingten Emissionen bis 2030 möglich. Es wird jedoch auf die hohen Unsicherheiten dieser Vermeidungsoption hingewiesen, die – so die Studie – in den noch offenen Fragen zur technologischen und ökonomischen Weiterentwicklung der notwendigen Technologien sowie zur Akzeptanz innerhalb der Bevölkerung begründet liegen. Unter der Annahme, dass die CCS-Technologien erfolgreich weiterentwickelt und eingesetzt werden können, beziffert die Studie die mögliche CO<sub>2</sub>-äquivalenten Einsparungen (gegenüber einer Referenzentwicklung ohne CCS) bis 2030 auf ca. 28 Mt CO<sub>2</sub>-äquivalent in der Stahlindustrie, ca. 7 Mt in der Zementindustrie und ca. 3 Mt in der Chemischen Industrie. Dabei wird von Vermeidungskosten von „bis zu“ 55 EUR/t CO<sub>2</sub>-äquivalent ausgegangen. Gegenüber der Referenzentwicklung entspräche dies einer durch den Einsatz von CCS erreichten Reduktion von rund 44 % in der Eisen- und Stahlindustrie, 32 % in der Zement- und Kalkindustrie und 4 % in der Chemischen Industrie (jeweils bezogen auf die gesamten, d. h. direkten plus indirekten THG-Emissionen).

Eine aktuelle Studie von Hermann et al. (2012) im Auftrag des WWF zu der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit von CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung in der deutschen Industrie kommt zu dem zentralen Ergebnis, „dass für alle Prozessemissionen die Energieeffizienz der CO<sub>2</sub>-Abscheidung besser ausfällt als für Kohlekraftwerke. Mit Ausnahme der Kalkherstellung sind weiterhin die Investitionskosten für die untersuchten Industrieprozesse ebenfalls geringer als bei Kohlekraftwerken. Für den Einsatz von CCS für CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Industrieprozessen in den genannten Bereichen lässt sich damit schlussfolgern, dass dieser Anwendungsbereich von CCS sich kostengünstiger darstellen lässt als der Einsatz von CCS in der Kohleverstromung.“

In Bezug auf eine Übertragbarkeit dieser auf das gesamten Bundesgebiet bezogenen Studienergebnisse auf NRW sieht LANUV NRW (2012b) zufolge der „Verein Deutscher Zementwerke“ (VDZ) jedoch die Anwendung von CCS in der nordrhein-westfälischen Zementindustrie kritisch, da die Anlagen in NRW vergleichsweise klein sind und CCS aufgrund der hohen Kosten in diesen Anlagen nicht verhältnismäßig sei. Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass der CCS-Einsatz in der Zementindustrie nur bei dem Neubau von Anlagen berücksichtigt werden kann, da die Nachrüstung bestehender Anlagen zu prohibitiv hohen Kosten führen würde (Hermann et al. 2012). Im Zuge des Neubaus von Zementwerken (wie auch Hochöfen) innerhalb der kommenden Jahrzehnte könnte prinzipiell auch eine stärkere Konzentration von Hochöfen angestrebt bzw. politisch angereizt werden. Dies würde allerdings zu einem „aussterben“ der kleinen

Zementwerke führen, die in NRW dominieren und weitestgehend von Familienunternehmen geführt werden (LANUV NRW 2012b).

Sowohl der VDZ und Vertreter der Stahlindustrie (vgl. LANUV NRW 2012b) als auch McKinsey Deutschland (2007a) weisen auf die Problematik relativ hoher Vermeidungskosten beim Einsatz von CCS-Technologien in der Industrie hin: „Eine Umsetzung dieser Maßnahmen würde zu einer Verzerrung der Wettbewerbsfähigkeit der betroffenen Industrien führen, sofern sie nicht im globalen Kontext erfolgt.“ (LANUV NRW 2012b)

Aus der zuvor diskutierten Literatur können die in Tabelle 5 aufgeführten Emissionsminderungen infolge eines möglichen CCS- bzw. CCU-Einsatzes in der Industrie in NRW für 2030 bzw. 2050 abgeleitet werden. Dabei werden die aus der Literatur entnommenen Minderungsspannen im Wesentlichen analog auf NRW übertragen, jedoch werden bei der Kalkindustrie aufgrund ihrer in NRW traditionell kleinteiligeren Struktur (und der damit verbundenen höheren spezifischen CCS- bzw. CCU-Vermeidungskosten) besonders für das Jahr 2030 etwas niedrigere Minderungen angenommen.<sup>18</sup>

**Tabelle 5: Mögliche Reduktion der THG-Prozessemissionen verschiedener Branchen in NRW durch den Einsatz von CCS- bzw. CCU-Technologie**

Branchen	Minderungsbezug	Minderung in 2030	Minderung in 2050
Eisen- und Stahlindustrie	Prozessemissionen der jeweiligen Branche im Jahr 2005	ca. 30 bis 45 %	ca. 60 %
Zement- und Kalkindustrie		ca. 30 %	ca. 80 bis 100 %
Chemische Industrie		ca. 10 %	ca. 20 bis 30 %

#### 4.2.5. Änderungen der Nachfrage nach Zwischen- und Endprodukten

Eine weitere Möglichkeit, den Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen der Industrie zu reduzieren, stellen Änderungen der Nachfrage nach Zwischen- und Endprodukten dar. Denkbar ist zum einen, dass es zu einer Substitution von besonders

<sup>18</sup> Die Studien für den WWF (2009) und von McKinsey Deutschland (2007a) halten beide bis 2030 gegenüber 2004 bzw. 2005 eine Minderung der prozessbedingten Emissionen in der Zement- und Kalkindustrie durch CCS in Höhe von rund 40 bis 45 % für möglich. Bis 2050 kann nach WWF (2009) eine vollständige Einstellung der prozessbedingten Emissionen in der Zement- und Kalkindustrie erfolgen.



energieintensiven hin zu weniger energieintensiven Input-Faktoren und/oder Produkten (mit gleichem Nutzen) kommt. Ein solcher Trend könnte als Folge stark steigender Energiepreise über den Markt induziert werden, er könnte sich aber auch (ggf. zusätzlich) infolge staatlicher Vorschriften und/oder soziokultureller Einstellungen ergeben.

Zum anderen könnten die Endverbraucherinnen und -verbraucher gegenüber einer Referenzentwicklung auch bewusst entscheiden, weniger industrielle Güter zu konsumieren bzw. die Gesellschaft könnte sich bewusst entscheiden, das Wirtschaftswachstum zu bremsen.

Beide Faktoren sind in den zuvor genannten Optionen zur Reduktion des Endenergiebedarfs und der THG-Emissionen der Industrie nicht oder nur in Ansätzen berücksichtigt, da keine wissenschaftlichen Studien vorliegen, die das Potenzial dieser Optionen auf der Nachfrageseite systematisch ermitteln.

An dieser Stelle wird vorsichtig geschätzt, dass sich die THG-Emissionen der Industrie in NRW infolge weitreichender Änderungen der Nachfrage nach Zwischen- und Endprodukten gegenüber einer Referenzentwicklung ohne entsprechende Änderungen um rund 5 bis 10 % bis 2030 und um 10 bis 15 % bis 2050 reduzieren lässt. Änderungen in der Nachfrage nach Zwischenprodukten könnten durch die Industrie selbst induziert werden, während die Nachfrage nach *End*produkten höchstens indirekt durch die Industrie beeinflussbar ist.

**Tabelle 6: Mögliche Reduktion der THG-Emissionen der Industrie in NRW durch Änderungen der Nachfrage nach Zwischen- und Endprodukten**

<b>Branche</b>	<b>Minderungsbezug</b>	<b>Minderung in 2030</b>	<b>Minderung in 2050</b>
GESAMTE INDUSTRIE	THG-Emissionen einer Referenzentwicklung	ca. 5 bis 10 %	ca. 10 bis 15 %

## 4.3. Bauen, GHD

### 4.3.1. Einleitung

Im Folgenden werden mögliche Energie- und Treibhausgasminderungspfade bis zum Jahr 2050 für den Sektor „Bauen, GHD“ in NRW diskutiert. Dabei werden vier grundsätzliche Minderungsoptionen unterschieden:

- Verbesserung der Gebäudeenergieeffizienz bestehender sowie neuer Gebäude
- Verbesserung der Energieeffizienz von Heizungen, Anlagen, Geräten und Maschinen
- Verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärmeerzeugung vor Ort<sup>19</sup>
- Verringerung bzw. Veränderung der Nachfrage nach Wohnraum und nach Leistungen des GHD-Sektors

### 4.3.2. Verbesserung der Gebäudeenergieeffizienz bestehender sowie neuer Gebäude

Eine zentrale Option für die Minderung von Emissionen stellt die Steigerung der Gebäudeeffizienz dar, d. h. eine Verringerung des Energieeinsatzes für die Bereitstellung von Raumwärme bei gleichbleibender Innentemperatur. Aufgrund der langen Lebensdauer von Gebäuden fällt der Erhöhung der Sanierungsrate und -tiefe im Bestand eine besonders wichtige Rolle für die Erhöhung der durchschnittlichen Effizienz der Gebäude zu. So wird auch in verschiedenen Klimaschutzszenarien für Deutschland die Erhöhung der Sanierungsrate als vielversprechendste Option angesehen, um die THG-Emissionen gegenüber heute bzw. gegenüber einer zukünftigen „Business-as-Usual“-Entwicklung in den Sektoren Private Haushalte und GHD zu reduzieren. Eine verbesserte Wärmedämmung ist dabei der größte Hebel zur Minderung der Emissionen.

In verschiedenen Klimaschutzszenarien (BMU 2010; BMWi 2010; WWF 2009) wird gegenüber 2005 eine Reduktion des spezifischen Energiebedarfs für Raumwärme im Gebäudebestand um 35 bis 50 % bis 2030 und um 55 bis 85 % bis 2050 erwartet. Diese Minderungen sind in erster Linie das Ergebnis verstärkter und höherwertiger Sanierungen sowie weiterer Verbesserungen in den Wärmestandards für Neubauten. Weitere Studien, die sich speziell mit dem Energiebedarf für Raumwärme in den deutschen Haushalten auseinandersetzen (z. B. Dena 2010, 2012; IÖW 2010; Shell 2011) bestätigen diese Größenordnung und zeigen ein wirtschaftlich erschließbares Potenzial zur

---

<sup>19</sup> Diese Minderungsoption wird auch in der AG „Private Sektoren“ behandelt und wird daher sowohl dort als auch hier diskutiert.

Minderung des Wärmeenergiebedarfs von längerfristig mindestens 55 bis 65 %. In allen Studien werden dafür gegenüber heute deutlich effizientere Neubauten sowie vor allem verstärkte und höherwertige Sanierungen als zentrale Instrumente für entsprechend ambitionierte Energie- und einhergehende THG-Reduktionspfade betrachtet. In den meisten Szenarien wird die energetische Sanierungsrate der Wohngebäude bis 2020 auf rund 2 % pro Jahr erhöht.

In den verschiedenen Energieszenarien wird gegenüber 2005 ein Anstieg der beheizten Wohnfläche bis 2030 um 10 bis 20 % angenommen. Nach 2030 bleibt die beheizte Wohnfläche dann ungefähr konstant, da angenommen wird, dass ein weiter steigender pro-Kopf-Wohnbedarf durch die abnehmende Bevölkerung kompensiert wird. Entsprechend sinkt der absolute Energiebedarf für die Raumwärme etwas weniger stark als der spezifische Bedarf: Gegenüber 2005 geht der absolute Bedarf je nach Szenario bis 2030 um 30 bis 45 % und bis 2050 um 40 bis 80 % zurück.

Bei der Übertragbarkeit dieser Angaben zur Gebäudeeffizienz aus den Deutschland-Szenarien auf NRW sind einige Besonderheiten des Bundeslandes gegenüber dem Bundesdurchschnitt zu beachten: Zum einen ist NRW stärker städtisch geprägt, es liegt also eine überdurchschnittlich hohe Siedlungsdichte vor. Dies kann sich zwar günstig auswirken auf den Erfolg von Sanierungskampagnen, da Multiplikatoreffekte durch Wohnungsbaugesellschaften verstärkt auftreten können, es dürfte aber der Nachteil dominieren, dass sich bei städtischer Prägung durch die Verschiebung von Einfamilienhäusern (EFH) hin zu Mehrfamilienhäusern (MFH) tendenziell hemmende Effekte in Bezug auf die angestrebte Erhöhung der Sanierungsrate ergeben: Der höhere Koordinationsaufwand von Sanierungsprojekten in MFH stellt häufig ein Hemmnis für potenzielle Investorengruppen dar.

Auf der anderen Seite ist NRW – insbesondere das Ruhrgebiet – von einer großen Anzahl von Nachkriegszeit-Zweckbauten geprägt. Deren Grund-Sanierung oder gegebenenfalls auch deren Abriss steht in vielen Fällen ohnehin an und kann daher zum Anlass für eine (ambitionierte) energetische Sanierung bzw. einen energieeffizienten Neubau genutzt werden.

Es wird hier unterstellt, dass sich die förderlichen und die hemmenden Charakteristika des Gebäudebestandes in NRW in Hinblick auf die Erhöhung der Gebäudeeffizienz in etwa die Waage halten und daher die bundesweit abgeleiteten Rückgänge des spezifischen sowie des absoluten Energiebedarfs für Raumwärme für das Land NRW übernommen werden können. Die entsprechenden Erkenntnisse werden in Tabelle 7 zusammengefasst.

**Tabelle 7: Mögliche Reduktion des spezifischen und des absoluten Energiebedarf für Raumwärme in Privaten Haushalten und GHD-Gebäuden in NRW**

Minderung des Raumwärmebedarfs gegenüber 2005	Minderung in 2030	Minderung in 2050
Spezifisch	ca. 35 bis 50 %	ca. 55 bis 85 %
Absolut	ca. 30 bis 45 %	ca. 45 bis 80 %

#### **4.3.3. Verbesserung der Energieeffizienz von Heizungen, Anlagen, Geräten und Maschinen**

Eine verstärkte **Nutzung von (Mini-)KWK-Anlagen** im Gebäudebereich stellt eine Option dar, durch die dieser Sektor zur Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen beitragen kann. Durch die Erzeugung und Nutzung von Strom und Wärme vor Ort kann die Nachfrage nach zentral, ohne Abwärmenutzung erzeugtem Strom (inklusive der nachgelagerten Verteilnetzverluste) verringert und somit der Brennstoffeinsatz und die damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen (letztlich im Umwandlungssektor, aber auch „netto“, d. h. in der Gesamtbetrachtung) reduziert werden. Eikmeyer et al. (2011) kommen in Bezug auf die Potenziale für KWK-Einzelobjektanlagen in NRW zu dem Ergebnis, dass eine Hochrechnung der Potenziale von KWK-Einzelobjektlösungen für ganz NRW nicht ohne weiteres möglich ist, da wesentliche Angaben wie Baualtersklasse oder Nutzungsart nicht flächendeckend vorliegen. Aber: „Eine Aussage ist jedoch für die Summe der Modellstädte, welche einen breiten, aber nicht repräsentativen Querschnitt durch die Stadtgrößen in NRW darstellen, möglich. Der Wärmebedarf, der außerhalb von wirtschaftlichen Fernwärmegebieten für solche Einzelobjekt- und Insellösungen errechnet wurde, erhöht hier den für Fernwärme-KWK geeigneten Wärmebedarf um 8 %<sup>20</sup>.“ Zu beachten ist, dass dieser Wert die untere Grenze des wirtschaftlichen Potenzials für dezentrale KWK angibt unter der Extrem-Annahme, dass das wirtschaftliche Fernwärmepotenzial zu 100% erschlossen wird.

Beim Wärmebedarf sind zusätzliche Energieeinsparungen durch die weitere Verbreitung moderner, effizienter Heizungen (insbesondere Brennwertheizungen bei der Verwendung von Gas, Öl oder auch Holzpellets) und entsprechender Regeltechnik möglich. Minderungen der THG-Emissionen sind außerdem durch einen Umstieg auf lokal verfügbare erneuerbare Energien möglich (s. folgender Abschnitt).

<sup>20</sup> In absoluten Zahlen wird in der Summe ein wirtschaftliches KWK-Fernwärmepotenzial in den sieben untersuchten Modellstädten von 10,6 TWh ausgewiesen, für ganz NRW beträgt das Potenzial lt. BEI-Studie 79,3 TWh.

Neben der Raumwärme weisen im GHD-Sektor auch die Verwendungszwecke Kühlung und Klimatisierung, Prozesswärme und -kälte, die Bereitstellung von Kraft, die Beleuchtung, sowie Bürogeräte einen relevanten Endenergiebedarf auf. Der spezifische Energiebedarf der zur Erzeugung von **Prozesswärme** eingesetzten Anlagen vermindert sich im Klimaschutzszenario des WWF (2009) im Durchschnitt um 40 % (Strom) bis 45 % (Brennstoffe). In der Studie im Auftrag von EnBW et al. (2009) wird bis 2050 ein spezifischer Rückgang von insgesamt 20 % angenommen. Die Abschätzungen des zukünftigen Bedarfs nach Prozesswärme im GHD-Sektor variieren stark zwischen den Szenarien, wodurch sich auch die Angaben zu dem Energiebedarf für Prozesswärme unterscheiden. Gegenüber 2005 bleibt dieser Energiebedarf bis 2050 entweder konstant EnBW et al. (2009), oder er verringert sich bis 2030 um etwa 10 bis 15 % und bis 2050 um 15 bis 30 % (BMWi 2010; WWF 2009).

Der spezifische Verbrauch für die **Bereitstellung von Kraft** verringert sich nach WWF (2009) zwischen 2005 und 2050 um 40 bis 50 %. In der Studie im Auftrag von EnBW et al. (2009) sinkt der spezifische Energiebedarf um etwa 20 % bis 2030 und um 35 % bis 2050. Der absolute Energiebedarf geht gegenüber 2005 – je nach Szenario – um 15 bis 30 % bis 2030 und um 30 bis 50 % bis 2050 zurück.

Der Strombedarf für **Beleuchtung** geht in den verschiedenen Klimaschutzszenarien besonders stark zurück, da sich der Einsatz von energieeffizienten Leuchtmitteln (z. B. Halogenleuchten mit Infrarot reflektierender Beschichtung (IRC), Niederdruck- und Hochdruck-Entladungslampen, LED, OLED) und neuen Systemen zur verstärkten Tageslichtnutzung (z. B. Tageslichtlenkung und Lichtkonzentratoren) deutlich erhöht. Bereits bis 2030 verringert sich den Szenarien zufolge der Strombedarf für Beleuchtung gegenüber 2005 um 30 bis 70 %, bis 2050 um 60 bis 80 %. Angaben zu spezifischen Verbräuchen der Beleuchtung werden in den Studien nicht aufgeführt, es sind jedoch spezifische Verbrauchsminderungen in ähnlicher Größenordnung wahrscheinlich.

Bei der Strombedarfsentwicklung für **Bürogeräte** werden gegenüber 2005 absolute Minderungen von 30 bis 40 % bis 2030 und von 50 bis 70 % bis 2050 beschrieben. Angaben zu spezifischen Verbräuchen von Bürogeräten werden in den Szenarien nicht gemacht.

Tabelle 8 fasst die möglichen spezifischen und absoluten Einsparungen verschiedener Endenergieverbräuche im GHD-Sektor zusammen. Bei der Prozesswärme, der Bereitstellung von Kraft, der Beleuchtung und bei den Bürogeräten wird nicht von einem relevanten Unterschied zwischen der bundesdeutschen Struktur – die den Analysen in den Szenariostudien zugrunde liegt – und der entsprechenden Struktur in NRW ausgegangen.

**Tabelle 8: Mögliche Reduktionen des spezifischen und des absoluten Energiebedarfs in verschiedenen Energieverbrauchsfeldern im GHD-Sektor**

Anwendungsfeld	Minderungsbezug	Minderung des Endenergiebedarfs vs. 2005	
		in 2030	in 2050
Prozesswärme	Spezifisch	ca. 10 bis 20 %	ca. 20 bis 40 %
Kraft		ca. 15 bis 25 %	ca. 35 bis 45 %
Beleuchtung		ca. 40 bis 60 %	ca. 60 bis 80 %
Bürogeräte		ca. 30 bis 40 %	ca. 50 bis 60%
Prozesswärme	Absolut	ca. 0 bis 15 %	ca. 10 bis 20 %
Kraft		ca. 15 bis 30 %	ca. 30 bis 50 %
Beleuchtung		ca. 40 bis 60 %	ca. 60 bis 80 %
Bürogeräte		ca. 20 bis 25 %	ca. 40 bis 45 %
GESAMT – ohne Raumwärme		ca. 10 bis 25 %	ca. 25 bis 40 %
GESAMT – mit Raumwärme		ca. 35 bis 50 %	ca. 50 bis 65 %

#### 4.3.4. Verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärmeerzeugung vor Ort

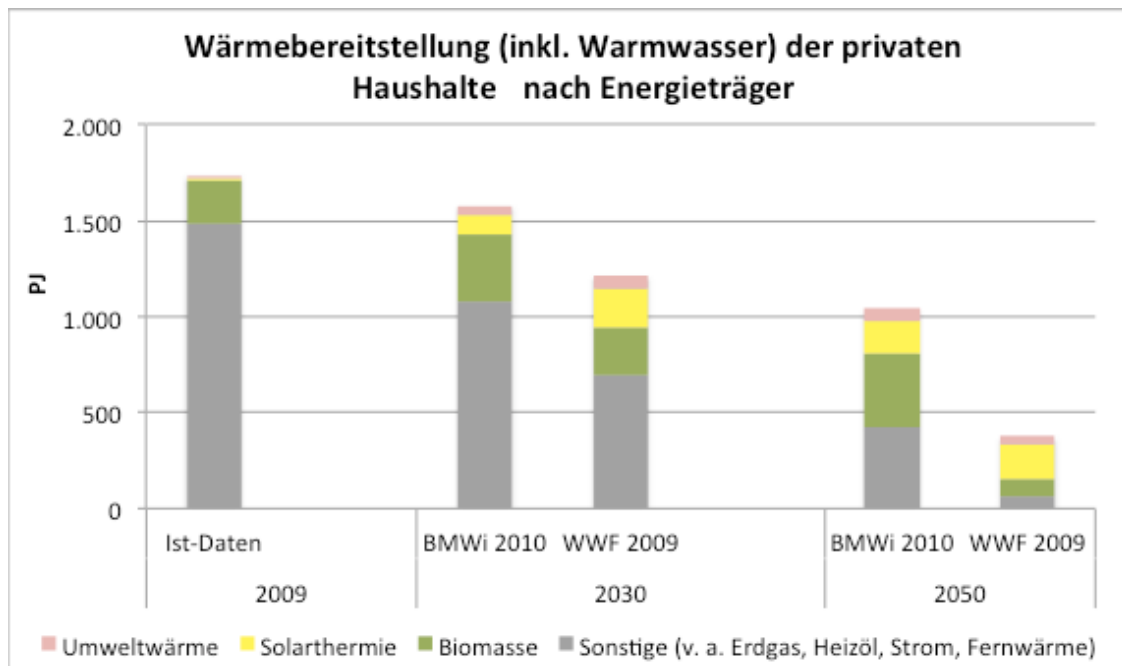
Neben einer Verbesserung der Anlageneffizienz und einem verstärkten Einsatz von Mini-KWK-Anlagen können im Gebäudebereich durch den Einsatz erneuerbarer Energien (Nutzung von Solarenergie, geothermischer und Umweltenergie sowie Biomasse) zur Wärmeerzeugung<sup>21</sup> CO<sub>2</sub>-Emissionen durch fossile Energieträger vermieden werden.

Wie Abbildung 3 anhand von zwei Klimaschutzszenarien für Deutschland (aus BMWi 2010; WWF 2009) verdeutlicht, wird in den nächsten Jahrzehnten von einem stark steigenden Anteil erneuerbarer Energien an der Wärmeversorgung (hier: Raumwärme

<sup>21</sup> Ein Ausbau der Fotovoltaik betrifft zwar die Akteure in diesem Sektor und wird auch in dieser AG diskutiert, im Rahmen dieser Arbeit wird aus Gründen der Vollständigkeit der Stromerzeugungsstruktur die Fotovoltaik aber ausschließlich im Umwandlungssektor diskutiert.

und Warmwasser privater Haushalte) ausgegangen. Dies hängt zum einen mit dem sinkenden absoluten Wärmebedarf infolge der steigenden energetischen Qualität der Wohngebäude zusammen, wodurch der Einsatz fossiler Energieträger reduziert werden kann. Zum anderen werden aber auch realisierbare Potenziale zur signifikanten Steigerung der Wärmeerzeugung aus erneuerbaren Energien gesehen.

**Abbildung 3: Entwicklung der Wärmebereitstellung (Raumwärme plus Warmwasser) nach Energieträgern in Privathaushalten bis 2050 in zwei Klimaschutzenszenarien<sup>22</sup>**



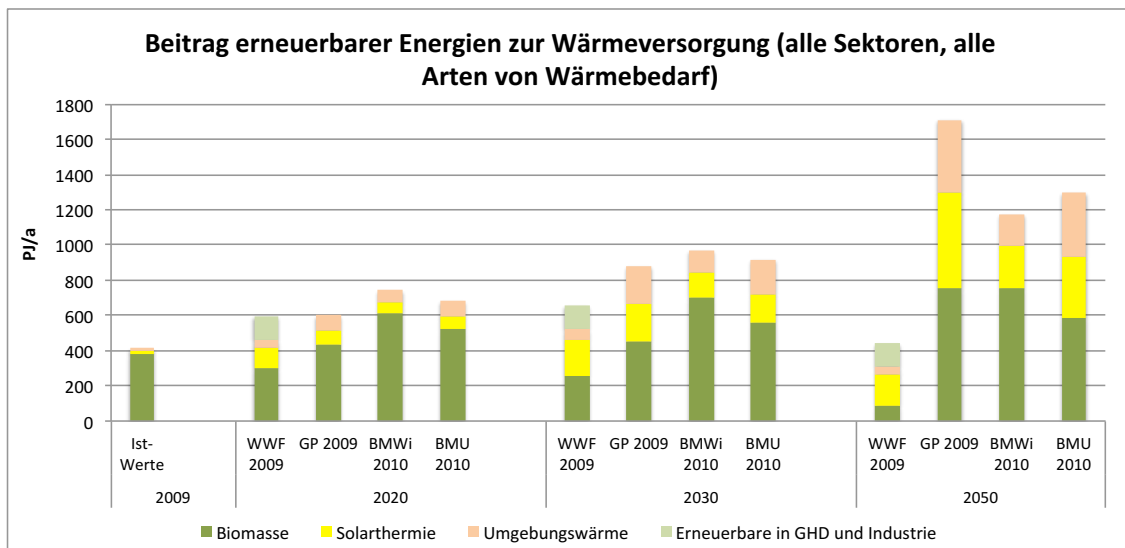
Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 4 zeigt die Entwicklung der Erneuerbaren-Wärme-Potenziale bis 2050 für verschiedene Klimaschutzenszenarien für die drei wärmerlevanten Sektoren Haushalte, GHD und Industrie<sup>23</sup>. Während es aufgrund konkurrierender Einsatzmöglichkeiten nachhaltig verfügbarer Biomasse unterschiedliche Einschätzungen dazu gibt, ob diese in Zukunft tatsächlich verstärkt zur Wärmebereitstellung genutzt werden sollte, sind sich die betrachteten Szenarien darin einig, dass die Nutzung der Solarthermie und der Umweltwärme gegenüber heute deutlich ausgebaut werden kann.

<sup>22</sup> Weitere Klimaschutzenszenarien (BMU 2012; Greenpeace 2009) sind in Abbildung 4 nicht aufgeführt, da sie die Beiträge der jeweiligen Energieträger nicht separat für die Haushalte auflisten.

<sup>23</sup> Die Szenarien weisen - mit Ausnahme der WWF-Studie - den GHD- und Industriesektor nicht gesondert aus, so dass hier keine sektorscharfe Darstellung möglich ist.

**Abbildung 4: Entwicklung der Wärmebereitstellung (Sektoren Haushalte, GHD und Industrie) aus erneuerbaren Energien nach Energieträgern bis 2050 in verschiedenen Klimaschutzenszenarien**

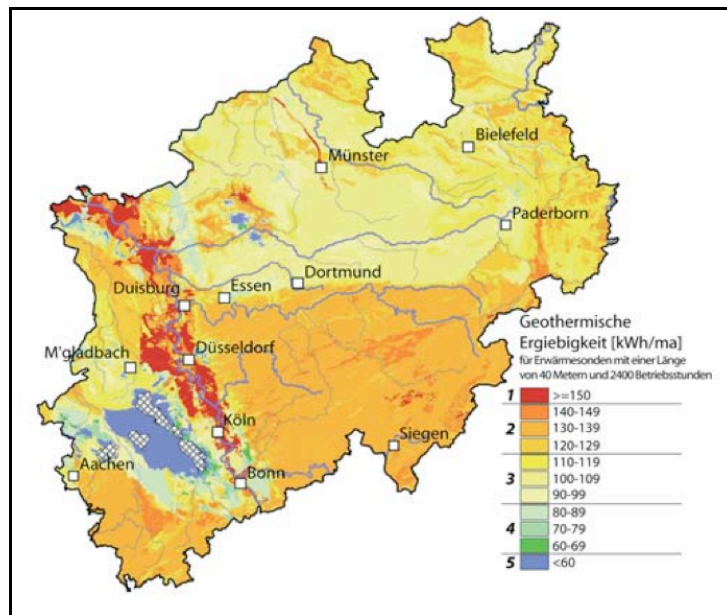


Quelle: Eigene Darstellung

Den Szenarien zufolge kann die dezentrale Nutzung erneuerbarer Energien bis 2030 auf nationaler Ebene einen Anteil von etwa 30 bis 40 % an der gesamten Wärmebereitstellung der Privathaushalte ausmachen (gegenüber rund 15 % heute), während der Anteil bis 2050 auf 60 bis 80 % steigen könnte. In NRW ist bei der Solarthermie und der Umweltwärmenutzung mit einem gegenüber Deutschland eher etwas niedrigerem relativen Beitrag zu rechnen, da der Anteil von Mehrfamilienhäusern hier höher ist als im Bundesdurchschnitt bzw. allgemein eine höhere Bevölkerungsdichte gegeben ist und somit – pro Kopf – weniger Fläche für Solarthermie- und Umweltwärme-Anlagen zur Verfügung steht. Auf der anderen Seite bescheinigt der Geologische Dienst des Landes NRW dem Bundesland „ein gutes bis sehr gutes oberflächennahes geothermisches Potenzial“ (vgl. Abbildung 5). Selbst bei Berücksichtigung von Restriktionsflächen (wie z. B. Wasserschutzgebieten) sind „noch mehr als 70 % der Landesfläche geothermisch sinnvoll nutzbar“ (Geologischer Dienst NRW o.J.).



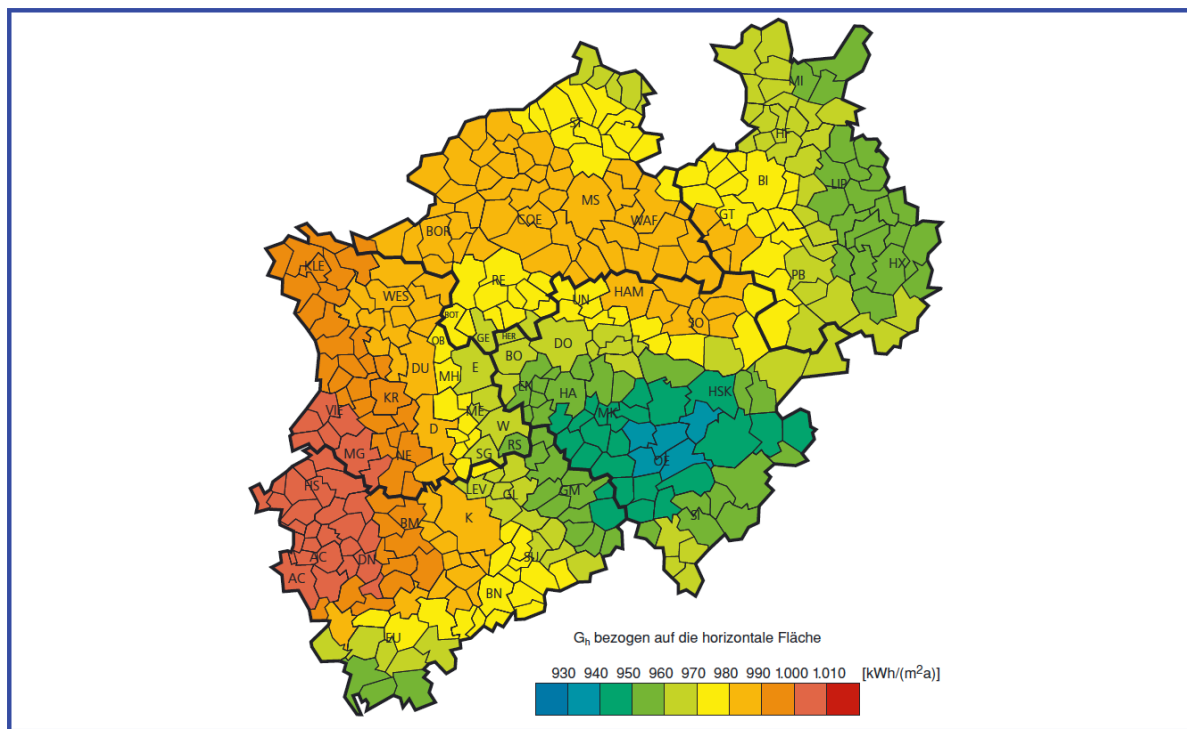
**Abbildung 5: Geothermische Ergiebigkeit des Untergrundes in NRW für 40 Meter tiefe Erdwärmesonden**



Quelle: Geologischer Dienst NRW (o.J.)

Für das Nutzungspotenzial der Solarstrahlung in Solarthermie- und PV-Anlagen ist die durchschnittliche jährliche Globalstrahlung der wichtigste Indikator. Er liegt für NRW unter den entsprechenden Werten für Süddeutschland und die südlichen Teile Ostdeutschlands, jedoch – insbesondere im Südwesten NRWs – über den Werten für Norddeutschland.

**Abbildung 6: Solarenergie-Potenzialatlas NRW: Summe der Globalstrahlung auf eine horizontale Fläche (Jahresmittel)**



Quelle: EnergieAgentur.NRW (2011)

Aufgrund der bezüglich der Gebäudestruktur und der Solareinstrahlung etwas ungünstigeren Bedingungen in NRW im bundesdeutschen Vergleich, wird in Tabelle 9 ein etwas langsamerer Anstieg des Anteils der lokal genutzten erneuerbaren Energien am gesamten Raumwärme- und Warmwasserbedarf der Privathaushalte in NRW angenommen. Gleichzeitig setzt der beschriebene Anstieg der Anteile voraus, dass in den nächsten Jahrzehnten eine weitgehende Wärmedämmung bestehender Gebäude erfolgt, die sich mindestens an dem in BMWi (2010) beschriebenen Ambitionsniveau anlehnt.

**Tabelle 9: Mögliche Anteile lokal genutzter erneuerbarer Energien in der Raumwärme- und Warmwasserversorgung der Privathaushalte in NRW**

Erneuerbare Energie	Anteil in 2030	Anteil in 2050
Biomasse	ca. 15 bis 20 %	ca. 20 bis 40 %
Solarthermie	ca. 5 bis 10 %	ca. 15 bis 40 %
Umweltwärme	ca. 2 bis 5 %	ca. 5 bis 10 %
GESAMT	ca. 20 bis 35 %	Ca. 40 bis 90 %

#### **4.3.5. Verringerung bzw. Veränderung der Nachfrage nach Wohnraum und nach GHD-Leistungen**

Eine verringerte bzw. veränderte pro-Kopf-Nachfrage nach Wohnraum und nach Leistungen des GHD-Sektors (d. h. „Suffizienz“) stellt schließlich eine weitere Option dar, die THG-Emissionen in diesem Bereich zu reduzieren. Allerdings haben die Akteure im Gebäudebereich und der GHD-Sektor selbst zumeist höchstens einen indirekten Einfluss auf das Nachfrageverhalten der Nutzerinnen und Nutzer. Denkbar wäre beispielsweise, dass der seit Jahrzehnten anhaltende Trend zu einem Anstieg der Pro-Kopf-Wohnfläche gestoppt werden könnte und nicht – wie in Szenarien unterstellt – anhalten wird. Durch eine Reduktion des Konsums könnte zudem der Energiebedarf und damit auch die THG-Emissionen im GHD-Sektor reduziert werden.

Zudem könnte der GHD-Sektor gezielt Waren (z. B. langlebig und reparaturfreundlich) und Dienstleistungen anbieten, die einen geringeren Ressourcen- und Energiebedarf aufweisen. Beispielsweise könnte die Tourismus-Branche verstärkt Urlaubsziele innerhalb Deutschlands oder in den europäischen Nachbarländern bewerben und Angebote für eine umweltfreundliche Anreise und umweltfreundliche Erlebnisse in der Urlaubsregion erstellen.

Umfassende quantitative Untersuchungen zu den möglichen Energieeinsparungen und THG-Emissionsminderungen infolge von grundlegenden Nachfrageänderungen liegen allerdings weder für NRW noch für Deutschland vor. Nach der Szenariostudie im Auftrag von EnBW et al. (2009) könnten bis 2050 alleine durch Verhaltensänderungen innerhalb der Gesellschaft (d. h. bei unveränderter technischer Entwicklung) im GHD-Sektor der Energiebedarf um rund 18 % gegenüber einer Referenzentwicklung gesenkt werden. Dies geschehe insbesondere infolge von „Flächenreduktion durch verstärkten Trend zu Home-Office und Onlinehandel“ sowie durch die unmittelbaren Auswirkungen eines geänderten Konsumverhaltens der privaten Haushalte auf den GHD-Sektor. Eine Übertragung dieser Angaben aus Deutschland-Szenariostudien auf NRW erscheint aufgrund einer sich nicht wesentlich unterscheidenden GHD-Struktur zulässig.

In verschiedenen Szenarien wird mit einem Anstieg der pro-Kopf-Wohnfläche von heute rund 43 m<sup>2</sup> auf 44 bis 47 m<sup>2</sup> in 2020 und 49 bis 52 m<sup>2</sup> in 2050 gerechnet. Sollte es gelingen, den Pro-Kopf-Wohnraum in den nächsten Jahrzehnten konstant zu halten, so könnte allein aufgrund dieses Effektes (d. h. ohne weitere technische Einsparmaßnahmen an Gebäudehülle und Anlagen) gegenüber einer Referenzentwicklung der Raumwärmebedarf im Jahr 2050 um rund 15 % gesenkt werden. Auch dies dürfte analog für NRW gelten.

**Tabelle 10: Mögliche Reduktion des Endenergiebedarfs (gegenüber einer Referenzentwicklung) des GHD-Sektors und des Energiebedarfs für Raumwärme in Wohngebäuden durch verändertes Nachfrageverhalten in NRW**

	Minderung gegenüber Referenzentwicklung	
	2030	2050
GHD-Sektor	ca. 10 bis 15 %	ca. 15 bis 20 %
Raumwärme	ca. 10%	ca. 15 %

## 4.4. Verkehr

### 4.4.1. Einleitung

Im Folgenden werden mögliche Energie- und Treibhausgasminderungspfade bis zum Jahr 2050 für den Sektor Verkehr in NRW diskutiert. Dabei werden drei grundsätzliche Minderungsoptionen unterschieden:

- Technische Effizienzsteigerung, Erhöhung der Auslastung und Energieträgerwechsel im Personenverkehr
- Technische Effizienzsteigerung, Erhöhung der Auslastung und Energieträgerwechsel im Wirtschafts- und Güterverkehr
- Verlagerung und -vermeidung von Personen- und Güterverkehren

### 4.4.2. Technische Effizienzsteigerung, Erhöhung der Auslastung und Energieträgerwechsel im Personenverkehr

Vorliegende Studien zeigen übereinstimmend ein großes Potenzial für Steigerungen der Effizienz im Straßenpersonenverkehr. Dieses Potenzial kann insbesondere erschlossen werden durch eine Kombination von effizienterer Fahrzeugtechnik, kleineren und leichteren Autos und einem weitreichenden Umstieg hin zu den im Vergleich zu konventionellen Verbrennungsmotoren effizienteren Elektromotoren.

Nach WWF (2009) könnte sich der spezifische Energiebedarf der Bestand-PKWs mit Benzinmotor zwischen 2005 und 2050 nahezu halbieren, von 8,3 auf 4,2 l/100 km. Die Studie von UBA (2009b) bestimmt zwischen 2005 und 2020 eine Verringerung des spezifischen Energiebedarfs entsprechender Fahrzeuge von 8,5 auf 7,5 l/100 km. Bei Diesel-PKW kommt es im selben Zeitraum zu einer Verringerung von 6,6 auf 5,9 l/100

km. Bei PKWs mit Dieselantrieb wird in der Studie von WWF (2009) für 2050 gegenüber 2005 eine Reduktion um 35 bis 40 % für möglich gehalten. Allerdings findet im Klimaschutzszenario dieser Studie im Jahr 2050 nahezu keine Fahrleistung mehr mit reinen Benzin- und Diesel-PKWs statt. Stattdessen verlagert sich der PKW-Verkehr mehr und mehr auf Hybrid-Fahrzeuge, und zwar zunächst konventionelle Hybride, deren Akkus über den Verbrennungsmotor geladen werden können, später (v. a. nach 2030) in hohem Maße auch Plug-in Hybride und reine Elektrofahrzeuge. Durch die verschiedenen Hybrid-Fahrzeuge und die Elektrofahrzeuge werden in dem Klimaschutzszenario der Studie im Jahr 2050 etwas über 80 % der PKW- und Kombi-Verkehrsleistung erbracht. Nicht zuletzt aufgrund der hohen Effizienz des Elektroantriebs verringert sich der spezifische Energiebedarf der gesamten Fahrzeugflotte zwischen 2005 und 2050 um rund 65 %.

In NRW könnten sich aufgrund des hohen Anteils an Ballungszentren bzw. aufgrund der hohen Bevölkerungsdichte bei einem entsprechenden Angebot von Fahrzeugen Elektro-PKW potenziell schneller durchsetzen als im bundesdeutschen Durchschnitt, da durch diese Charakteristika in NRW eine engmaschigere Infrastruktur aufgebaut werden kann und im Durchschnitt auch kürzere Fahrtwege zurückgelegt werden. Für die Abschätzung des realisierbaren THG-Minderungspotenzials durch Elektromobilität in Tabelle 1 wurde aus diesem Grund auf die im Vergleich zu vielen anderen Klimaschutzszenarien in Bezug auf das Wachstum der PKW-Elektromobilität optimistischen Annahmen von WWF (2009) zurückgegriffen.

Abschätzungen zu dem realisierbaren Potenzial einer Erhöhung der Auslastung im Personenverkehr liegen nicht vor. Eine moderate Erhöhung der Auslastung von derzeit 1,5 Personen auf 1,6 Personen pro PKW würde – unter der Annahme einer gleichbleibenden PKW-Personenverkehrsleistung – den Energiebedarf des PKW-Verkehrs um 6 bis 7 % reduzieren.

Im Schienenpersonenverkehr sieht die Studie im Auftrag des WWF (2009) gegenüber dem Personenstraßenverkehr deutlich geringere realisierbare technische Potenziale zur Reduktion des spezifischen Energieverbrauchs. Gegenüber 2005 wird bis 2050 beim Eisenbahnverkehr ein Rückgang des Energieverbrauchs um 15 % im Nahverkehr und um 25 % im Fernverkehr beschrieben. Im schienengebundenen öffentlichen Straßenpersonennahverkehr (S-Bahn, U-Bahn, Straßenbahn) steigt die spezifische Effizienz bis 2050 um rund 17 %.

Beim Luftpersonenverkehr verbessert sich im Klimaschutzszenario nach WWF (2009) die technische Effizienz um 40 %. Dadurch kann der Kerosinbedarf trotz ansteigender Verkehrsleistung (+ 19 % in 2050 gegenüber 2005) reduziert werden.

**Tabelle 11: Mögliche Reduktion des spezifischen und absoluten Energiebedarfs sowie der THG-Emissionen durch höhere Effizienz, höhere Auslastung und Energieträgerwechsel für den Personenverkehr in NRW**

Option	Minderungsbezug	Minderung in 2030	Minderung in 2050
Technische Effizienzsteigerung	Spezifischer Energiebedarf des konventionellen PKW-Bestands in 2005	ca. 25 bis 35 %	ca. 35 bis 45 %
Elektrischer (Teil-) Antrieb im PKW-Verkehr	Absoluter THG-Ausstoß (nur direkt) des PKW-Verkehrs in Referenzentwicklung ohne elektrischen Antrieb	ca. 15 bis 20 %	ca. 50 bis 60 %
Erhöhung der durchschnittlichen Auslastung der PKW	Energiebedarf des PKW-Verkehrs in Referenzentwicklung	ca. 5 %	ca. 5 bis 10 %
Technische Effizienzsteigerung	Energiebedarf des Luftpersonenverkehrs in Referenzentwicklung	ca. 20 %	ca. 40 %

#### **4.4.3. Technische Effizienzsteigerung, Erhöhung der Auslastung und Energieträgerwechsel im Wirtschafts- und Güterverkehr**

Im Straßengüterverkehr wird nach WWF (2009) auch in 2050 noch nahezu ausschließlich Dieseltreibstoff verwendet. Dieser Diesel wird jedoch im Zeitverlauf mit steigendem Anteil (2050=100 %) aus Biomasse gewonnen.<sup>24</sup> Der auf die Fahrleistung bezogene spezifische Verbrauch der Diesel-LKW reduziert sich im Klimaschutzszenario der Studie bis Mitte des Jahrhunderts gegenüber 2005 um knapp 30 %, von 23,5 auf 16,8 l/100 km. Gleichzeitig wird die Auslastung der LKW um 40 % erhöht. Der Energiebedarf für den Straßengüterverkehr kann durch die höhere Effizienz und die höhere Auslastung trotz des erwarteten Anstiegs der Fahrleistung (+ 21 %) um rund 8 % reduziert werden. Im Klimaschutzszenario der Studie im Auftrag des EnBW et al.

<sup>24</sup> Im Klimaschutzszenario der WWF-Studie wird die Strategie verfolgt, die nachhaltig verfügbare Biomasse ganz überwiegend im Straßengüterverkehr einzusetzen, da in diesem Bereich keine ökonomisch vertretbare, klimafreundliche Alternative gesehen wird. Um sehr ambitionierte THG-Minderungen bis 2050 zu erreichen (-95 % gegenüber 1990) müsste nach der Studie zusätzlich der Kerosinbedarf aus Biomasse bereitgestellt werden, was aber voraussichtlich nur durch einen signifikanten Biomasse-Import zu erreichen wäre.

(2009) wird im Straßengüterverkehr ebenfalls auf biomassebasierende Kraftstoffe gesetzt, hier beträgt deren Anteil am Endenergieverbrauch im Jahr 2050 jedoch „nur“ 42 %. Zusätzlich wird der Einsatz von Brennstoffzellentechnik unterstellt, Wasserstoff erreicht einen Anteil von 21 %. Der restliche Energiebedarf wird überwiegend weiterhin durch fossiles Diesel (34 %) bereitgestellt.

Bezogen auf die Tonnenkilometer kann der spezifische Energieverbrauch des Schienen-güterverkehrs nach WWF (2009) infolge technischer Verbesserungen und einer höheren Auslastung um knapp 35 % reduziert werden. Einen gewissen Anteil an dieser Effizienzsteigerung hat auch die (weitere) Substitution von Dieseltraktion durch die effizientere Elektrotraktion. Der Diesel-Anteil am gesamten Verkehrsaufkommen des Schienengüterverkehrs sinkt von rund 14 % in 2005 auf 2 bis 3 % in 2050.

Beim Luftgüterverkehr verbessert sich im Klimaschutzenszenario nach WWF (2009) die technische Effizienz um 40 %. Gleichzeitig verdreifacht sich die Frachtleistung des Luftverkehrs, bleibt jedoch gemessen an der gesamten Güterverkehrsleistung von geringer Bedeutung.

Bezüglich der Energie- und THG-Minderungsoptionen im Güterverkehr scheinen keine besonderen Charakteristika von NRW gegen eine Übertragung der Erkenntnisse aus Deutschland-Szenarien zu sprechen. Allerdings ist es aus mehreren Gründen wahrscheinlich, dass der Güterverkehr in NRW in den nächsten Jahrzehnten ein stärkeres Wachstum aufweisen wird, als im bundesdeutschen Durchschnitt.<sup>25</sup>

---

<sup>25</sup> So wird erwartet, dass der (Bundes-) Länder-übergreifende Transit-Güterverkehr durch NRW überdurchschnittlich stark zunehmen wird, nicht zuletzt weil bedeutende Nord-Süd-Verbindungen vom Seehafen Rotterdam und den deutschen Seehäfen auf Schiene und Autobahn durch NRW verlaufen. Bei mehreren durch NRW verlaufenden Autobahnen handelt es sich zudem um zentrale Bodenverkehrsachsen, denen in der Verkehrsplanung der Europäischen Union eine bedeutende Rolle zukommt.

**Tabelle 12: Mögliche Reduktion des spezifischen und absoluten Energiebedarfs sowie der THG-Emissionen durch höhere Effizienz, höhere Auslastung und Energieträgerwechsel für den Wirtschafts- und Güterverkehr in NRW**

Option	Minderungsbezug	Minderung in 2030	Minderung in 2050
Technische Effizienzsteigerung	Spezifischer Energiebedarf des LKW-Bestands in 2005	ca. 15 %	ca. 25 bis 30 %
Einsatz von Biokraftstoffen	Absoluter THG-Ausstoß des LKW-Verkehrs in Referenzentwicklung ohne Biokraftstoffeinsatz (Annahme: Biokraftstoffe zu 60 % klimaneutral)	ca. 20 bis 25 %	ca. 50 bis 60 %
Technische Effizienzsteigerung und höhere Auslastung	Spezifischer Energiebedarf des Schienengüterverkehrs in 2005	ca. 15 %	ca. 30 bis 35 %
Technische Effizienzsteigerung	Spezifischer Energiebedarf des Luftgüterverkehrs in 2005	ca. 20 %	ca. 40 %

#### 4.4.4. Verkehrsverlagerung und -vermeidung

Gegenüber den jeweiligen Jahren in einer Referenzentwicklung, nimmt das Klimaschutzszenario nach WWF (2009) eine Minderung der Personenverkehrsleistung um 2 % in 2030 und 2050 an<sup>26</sup>: Veränderte Verhaltensweisen führen im Klimaschutzszenario zu geringfügig reduziertem Pendlerverkehr, einem niedrigeren, weil „bewussterem“ Freizeitverkehr und einem gewissen Umstieg vom PKW auf den Rad- und Fußverkehr im Kurzstreckebereich.

Hingegen wird in einem Szenario in Auftrag von EnBW et al. (2009), in dem ökologisch orientierte Verhaltensänderungen unterstellt werden, davon ausgegangen, dass sich die Personenverkehrsleistung bis 2050 gegenüber einer Referenzentwicklung um 15 % reduzieren ließe. Ein besonders starker Rückgang (ca. 25 %) wird in diesem

<sup>26</sup> Gegenüber 2005 nimmt die absolute Personenverkehrsleistung in dem Klimaschutzszenario bis 2020 leicht zu (um knapp 2 %). In der Folge sinkt sie – aufgrund der abnehmenden Bevölkerungszahl – kontinuierlich und liegt 2050 rund 8 % unter dem Niveau von 2005.



Szenario im motorisierten Individualverkehr erreicht. Die Strecke, die im Jahr 2050 in Deutschland durchschnittlich in einem Straßenfahrzeug zurückgelegt wird, sinkt von ca. 11.000 km pro Person und Jahr im Referenzszenario auf ca. 8.000 km im Klimaschutzszenario. Gleichzeitig ließe sich auch der Trend zu einem Anstieg des Personenflugverkehrs zunächst reduzieren und anschließend, etwa ab 2030 umkehren. Dieser signifikante Rückgang wird durch ein Reduzieren unnötiger Fahrten, besseres Organisieren der Fahrten sowie durch Wechsel auf andere Verkehrsarten, vorrangig den Schienenverkehr, erreicht.

Die Studie von UBA (2010b) quantifiziert das Minderungspotenzial des kompletten Spektrums an Verkehrsvermeidungsmaßnahmen (raumplanerisch, gesetzlich, monetär und strukturell) für den landgebundenen motorisierten Personenverkehr. Demnach ist zwischen 2005 und 2030 eine Verminderung der Personenkilometer von 1.053 Mrd. auf 985 Mrd. möglich.

Im Personenverkehr reduziert eine Verlagerung von PKW-Fahrten auf die Verkehrsmittel des Umweltverbundes die spezifischen Treibhausgasemissionen um etwa 50 % (bei Bussen und Bahnen) bzw. um nahezu 100 % (bei einem Umstieg auf Rad oder Fuß) (IFEU et al. 2011).

Die Perspektiven einer signifikanten Verlagerung des Personenverkehrs werden von vorliegenden Studien jedoch unterschiedlich eingeschätzt. Einige Studien (z. B. WWF 2009 und BMWi 2010) sehen keine Möglichkeit einer bedeutenden Verlagerung von der Straße oder dem Flugzeug auf die Schiene. Eine solche Verlagerung sei nach Auffassung von Fachleuten – auch angesichts der demographischen Entwicklung – „nahezu unmöglich“ (WWF 2009). Im WWF-Klimaschutzszenario wird entsprechend bis 2050 gegenüber 2005 ein nahezu stabiler „Modal Split“ angenommen. Verglichen mit der Referenzentwicklung kommt es nur zu einer geringfügigen Verringerung des Anteils der Straße an der gesamten Personenverkehrsleistung um ca. 0,5 Prozentpunkte.

Hingegen geht die Studie von UBA (2010b) davon aus, dass zwischen 2005 und 2030 eine Erhöhung des Anteils der Bahn am Modal Split des Personenverkehrs von 7 auf 15 % möglich ist. Wesentliche Maßnahmen dafür sind u. a. ein stärkerer Ausbau des Schienennetzes, die Erhöhung der spezifischen Trassenkapazität, der Neubau, Ausbau und die Reaktivierung von Gleisanschlüssen und die Förderung des Kombinierten Verkehrs.

Im Klimaschutzszenario der Studie von EnBW et al. (2009), das ökologisch orientierte Verhaltensänderungen unterstellt, kommt es ebenfalls zu einer deutlichen Verschiebung des Verhältnisses zwischen motorisiertem Individualverkehr auf der einen Seite und ÖPNV/Schienenpersonenverkehr auf der anderen Seite: Lag dieses Verhältnis im Jahr

2005 bei etwa 85 zu 15, sinkt es in diesem Szenario auf 78 zu 22 in 2030 und auf 71 zu 29 in 2050.

NRW hat durch seinen hohen Anteil an Ballungszentren bzw. die hohe Bevölkerungsdichte ein relativ hohes Potenzial in Bezug auf Klimaschutzstrategien, die Verkehrsverlagerungen auf den öffentlichen Personenverkehr anstreben.

Beim Güterverkehr werden über die verschiedenen Studien hinweg bedeutende Potenziale für eine Verkehrsverlagerung gesehen. So wird im Klimaschutzszenario der WWF-Studie im Güterverkehr der Anteil der Schiene an den Verkehrsleistungen im Vergleich zum Referenzszenario in 2050 um gut ein Drittel erhöht. Dies erfolgt unter der Annahme deutlich verbesserter Auslastungen des vorhandenen Netzes. Der Anteil des Eisenbahngüterverkehrs am gesamten (landbasierten) Güterverkehr steigt in dem Klimaschutzszenario (analog zu den Klimaschutzszenarien in BMWi 2010) von rund 18 % im Jahr 2005 auf 22 % in 2030 und 28 % in 2050. Der Anteil der Binnenschifffahrt am Güterverkehr verbleibt in den verschiedenen Szenarien relativ konstant, bei knapp 10 %.

UBA (2010b) hält eine Steigerung des Anteils des Güterverkehrsaufwands im Schienenverkehr in ähnlicher Größenordnung (auf 25 % bis 2030) für realisierbar. Dieser Annahme wird eine Reform der LKW-Maut, Verkehrsvermeidung im Güterverkehr sowie Förderprogramme zugrunde gelegt. Durch Förderprogramme für den Gleisanschlussausbau und den kombinierten Verkehr wird bis 2030 mit einer Verlagerung von etwa 50 Mrd. Tonnenkilometern vom Straßen- auf den Schienengüterverkehr gerechnet.

Die Stadt- und Verkehrsplanung hat – durch die Gestaltung der Verkehrsorganisation (inkl. Infrastrukturbereitstellung) – einen großen Einfluss auf das Mobilitätsverhalten der Bürgerinnen und Bürger. In der Praxis können jedoch die vielfältigen technischen, planerischen, organisatorischen und finanziellen Möglichkeiten oft nicht ausgeschöpft werden, da entsprechende Informationen zu Umweltwirkungen von Maßnahmen nicht vorliegen. Hinzu kommen strukturelle Defizite, wie mangelnde Ämter- und Verkehrsmittelübergreifende Arbeit (IFEU et al. 2011).

Nach Einschätzungen des UBA (2010b) ließe sich jedoch der landgebundene motorisierte Personenverkehr durch die Umsetzung einer verkehrsvermeidenden Stadt- und Verkehrsplanung gegenüber dem jeweiligen Jahr in einer Trendentwicklung bis 2020 um 10 % und bis 2030 um 15 % verringern. Zudem könnte demnach der landgebundene Güterverkehr bis 2020 und 2030 durch einen Verzicht auf den Neubau von Straßen um jeweils etwa 3 % verringert werden. Schließlich wären der Studie zufolge Maßnahmen zur Förderung regionaler Wirtschaftskreisläufe in der Lage, den landgebundenen Güterverkehr – erneut gegenüber einer Referenzentwicklung – in 2020 und in 2030 um

etwa 5 % zu verringern. Die Einsparungen beim Energiebedarf und bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen würden jeweils in ähnlicher Größenordnung liegen.

Die folgende Tabelle führt die möglichen Energie- und CO<sub>2</sub>-Minderungen einer auf Verkehrsvermeidung und -verlagerung ausgerichteten Stadt- und Verkehrsplanung nicht gesondert auf, da davon ausgegangen wird, dass die höheren Werte der angenommenen Spannen zur Verkehrsvermeidung und Verkehrsverlagerung (siehe folgende Tabelle) bereits eine weitgehende Umsetzung einer entsprechenden Stadt- und Verkehrsplanung bedingen.

**Tabelle 13: Mögliche Reduktion des Endenergiebedarfs des Verkehrssektors in NRW durch Verkehrsverlagerung und -vermeidung**

Option	Minderungsbezug	Minderung in 2030	Minderung in 2050
Vermeidung von Personenverkehr durch Verhaltensänderungen und Stadt- und Verkehrsplanung	Energiebedarf des Personenverkehrs in Referenzentwicklung ohne Verkehrsvermeidung	ca. 5 bis 15 %	ca. 10 bis 20 %
Vermeidung von Güterverkehr durch Stadt- und Verkehrsplanung und Änderungen des Wirtschaftskreislaufs	Energiebedarf des Güterverkehrs in Referenzentwicklung ohne Verkehrsvermeidung	ca. 5 bis 10 %	ca. 5 bis 10 %
Verlagerung von Teilen des Personenverkehrs von der Straße auf die Schiene <sup>27</sup>	Energiebedarf des Personenverkehrs in Referenzentwicklung ohne Verkehrsverlagerung	ca. <1 bis 5 %	ca. <1 bis 10 %
Verlagerung von Teilen des Güterverkehrs von der Straße auf die Schiene <sup>28</sup>	Energiebedarf des Güterverkehrs in Referenzentwicklung ohne Verkehrsverlagerung	ca. 3 %	ca. 5 bis 10 %

<sup>27</sup> Annahme: Der spezifische Energiebedarf des Schienenpersonenverkehrs bzw. des ÖPNV beträgt etwa die Hälfte des entsprechenden Bedarfs des Straßenpersonenverkehrs.

<sup>28</sup> Annahme: Der spezifische Energiebedarf des Schienengüterverkehrs beträgt etwa ein Drittel des entsprechenden Bedarfs des Straßengüterverkehrs.

## 4.5. Landwirtschaft, Forst, Boden

Nach Angaben des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen wurden im Jahr 2009 3 % der Treibhausgasemissionen in NRW durch die Landwirtschaft verursacht (LANUV NRW 2011)<sup>29</sup>; bezogen auf die nicht Energie bedingten Emissionen von Methan und Lachgas ist der Anteil der Landwirtschaft an den Gesamtemissionen dieser THG jedoch signifikant, nämlich jeweils rund 41 % (LANUV NRW 2012c). Der größte Anteil der Emissionen wird im Bereich der landwirtschaftlichen Böden freigesetzt. Weitere Anteile entfallen auf die Fermentation (Darmgärung) sowie auf das Wirtschaftsdüngermanagement. Nachfolgend werden die Ergebnisse relevanter Studien zu Emissionsminderungspotenzialen in den Bereichen Landwirtschaft und – damit in Zusammenhang stehend – Boden dargestellt. Der Bereich Forst wird aufgrund der eingeschränkten Datenlage nicht behandelt.

Die Studie „Modell Deutschland“ (WWF 2009) ermittelt für Deutschland im ambitionierten Szenario „Innovation“ eine THG-Minderung um 26 % bis zum Jahr 2020 und um 43 % bis zum Jahr 2050 (Ausgangsjahr 2005). Die Maßnahmen und Faktoren berücksichtigen die Reduktion der THG-Emissionen und -Einbindungen. Die resultierende THG-Minderung wird vor allem durch zwei zentrale Veränderungen erreicht:

- einen deutlichen Rückgang des Viehbestandes (als Ergebnis veränderten Konsumverhaltens)
- die gasdichte Lagerung von Gülle und die verstärkte Nutzung der Gülle zur Energiegewinnung in Biogasanlagen.

Die Studie für das UBA (2009b) geht - bezogen auf das Jahr 2005 - von einer deutlich moderateren Minderung um 9 % bis 2020 und um 13 % bis 2030 aus. Die Studie rechnet bis 2030 mit:

- verminderten Tierbestandszahlen bei Rindern, Schafen und Schweinen (u. a. durch EU-Quotenregelung und Produktivitätssteigerungen),
- einer starken Zunahme der Geflügelbestände,
- der Förderung des ökologischen Landbaus,
- der Reduktion des Stickstoffdüngereinsatzes,

---

<sup>29</sup> In der Treibhausgasbilanz werden im Sektor Landwirtschaft gemäß internationaler Konvention nur die nicht energiebedingten Emissionen, d.h. vor allem die Emissionen von CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O bilanziert. Die energiebedingten Emissionen der Landwirtschaft werden im Modell im Bereich GHD mit erfasst, werden aber inhaltlich in der AG 5 diskutiert.

- der Reform der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP), u.a. mit dem Ziel, den Prozess hin zur Extensivierung zu unterstützen und zu einer Verringerung der Tierzahlen und des Stickstoffdüngereinsatzes sowie einer stärkeren Förderung des ökologischen Landbaus zu kommen und
- der Zunahme der Anbauflächen für Ölsaaten und Mais.

In einer Studie des IÖW (2008) werden zur Abschätzung von Effekten einer konsequenten Klimaschutzorientierung der deutschen Landwirtschaft unterschiedliche hypothetische „Extremszenarien“ gerechnet, aus denen das Gesamtreduktionspotenzial von THG-Emissionen im Landwirtschaftssektor abgeschätzt wird (ohne Zeithorizont). Im Ergebnis wird ein maximal theoretisch mögliches Reduktionspotenzial von minus 51,6 % (bezogen auf die Emissionen von 2006) ermittelt. Folgende Änderungen können dieser Studie zufolge in besonderem Maße zur Emissionsreduktion beitragen:

- Wiedervernässung von entwässerten Moorflächen
- Umstellung auf ökologischen Landbau
- Klimaschutzoptimierte Stallhaltung unter Beachtung von Tierschutzaspekten
- Steigerung der Erträge und Leistungen unter Berücksichtigung von Umwelt-, Klima- und Tierschutzaspekten
- Ausbau der Nutzung von Gülle und Mist in Biogasanlagen
- Optimierte Rinderhaltung
- Reduktion von besonders klimaschädlich produzierten Futtermittel-Importen

Nach Auswertung der aktuell verfügbaren Literatur (IÖW 2008; UBA 2009b; vTI 2012; WWF 2009) können die wesentlichen Potenziale für Klimaschutz in der Landwirtschaft einerseits in der Emissionsminderung pro Produkteinheit und andererseits in verändertem Konsumverhalten liegen, das die Nachfrage nach Agrarprodukten mit unterschiedlicher Klimawirksamkeit bestimmt. Außerdem kann die Landwirtschaft durch die Erzeugung von nachwachsenden Rohstoffen und Bioenergie aktiv zum Klimaschutz beitragen. Die maßgeblichen Stellschrauben zur Reduktion der THG-Emissionen in der Landwirtschaft sind demnach:

- Minderung der N<sub>2</sub>O-Emission durch Steigerung der Effizienz von Stickstoffdüngern und Futtermitteln

- Minderung der CH<sub>4</sub>-, NH<sub>3</sub>- und N<sub>2</sub>O-Emissionen durch ein optimiertes Wirtschaftsdüngermanagement
- Vermeidung von CO<sub>2</sub>- und N<sub>2</sub>O-Emissionen durch den Erhalt der Vorräte an organischem Bodenkohlenstoff
- Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Steigerung der Energieeffizienz der Produktion
- Optimierung der Klimaschutzleistung von Bioenergiesystemen
- Beitrag zu einer Anpassung des Konsumverhaltens in Richtung einer gesunden und klimafreundlichen Ernährungsweise

## **4.6. Private Haushalte**

### **4.6.1. Einleitung**

Im Folgenden werden mögliche Energie- und Treibhausgasminderungspfade bis zum Jahr 2050 für den Sektor „Private Haushalte“ in NRW diskutiert. Dabei werden vier grundsätzliche Handlungsfelder unterschieden:

- Erhöhung der Effizienz der verwendeten Geräte
- Verbesserung der Gebäudeenergieeffizienz bestehender sowie neuer Gebäude
- Verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärmeerzeugung vor Ort
- Verhaltensänderungen bzw. Änderungen der Konsummuster

Im Folgenden wird zunächst die Erhöhung der spezifischen Energieeffizienz in verschiedenen elektrischen Anwendungsbereichen diskutiert. Die entsprechenden Minderungspfade aus unterschiedlichen Klimaschutzszenarien für Deutschland werden bis 2030/2050 für die Informations- und Unterhaltungselektronik, für die großen Haushaltsgeräte in den Bereichen Kühlen, Gefrieren, Spülen, Waschen und Trocknen sowie für das Kochen aufgeführt. Diese Anwendungsbereiche machen zusammen den Großteil des gesamten Stromverbrauchs in den privaten Haushalten aus.

Abschließend wird die Relevanz von Lebensstiländerungen auf die THG-Emissionen diskutiert.

Die Handlungsfelder „Verbesserung der Gebäudeenergieeffizienz bestehender sowie neuer Gebäude“ und „Verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärmeerzeugung vor Ort“ sind ebenfalls für die AG „Wohnen/GHD“ relevant und wurden bereits in dem entsprechenden Kapitel ausführlich dargestellt.

#### 4.6.2. Erhöhung der Effizienz der verwendeten Geräte

Der Stromverbrauch der Haushalte in NRW betrug im Jahr 2010 nach vorläufigen statistischen Zahlen 32 TWh (MKULNV 2011) und damit 23 % des gesamten Stromverbrauchs in NRW. Die größten Anteile hat dabei die „Weiße Ware“ (Kühlen, Gefrieren, Spülen, Waschen, Trocknen, Kochen) mit etwas über 40 % am gesamten Strombedarf der privaten Haushalte, auch wenn dieser Anteil in den letzten Jahren abgenommen hat. Stark zugenommen hat dagegen in den letzten Jahren der Stromverbrauch durch die Information- und Unterhaltungselektronik (insbesondere TV- und Computer-Technik). Dieser Bereich hatte mit knapp 25 % den zweitgrößten Anteil am Gesamtstromverbrauch der Haushalte (EnergieAgentur NRW 2011).

In diesem Abschnitt werden die in verschiedenen Klimaschutzszenarien aufgezeigten Minderungen des spezifischen und absoluten Strombedarfs in den Bereichen „Informations- und Unterhaltungselektronik“ und „große Haushaltsgeräte“ dargestellt. Diese elektrischen Anwendungsbereiche machen die größten Teile des Gesamtstromverbrauchs in den privaten Haushalten in NRW aus, insgesamt rund zwei Drittel (EnergieAgentur NRW 2011). Für die Entwicklung des gesamten Strombedarfs ist entscheidend, wie sich die drei folgenden Dimensionen in Zukunft bei den einzelnen stromverbrauchenden Geräten entwickeln werden:

- Anzahl der Geräte (u. a. abhängig von demographischen Rahmendaten ),
- Effizienz der Geräte (Leistungsaufnahme) und
- durchschnittliche Betriebsdauer (Nutzungsintensität).

Bei der **Informations- und Unterhaltungselektronik** kann der *spezifische* Strombedarf, d. h. der Strombedarf pro Gerät, nach Einschätzungen der untersuchten Studien, die hierzu Angaben machen (UBA 2009b; WWF 2009), gegenüber 2005 bis 2030 um rund 30 bis 40 % und bis 2050 um 50 bis 60 % reduziert werden. Aufgrund des gleichzeitig erwarteten weiteren Anstiegs der Geräteanzahl im Bereich der Informa-

tions- und Unterhaltungselektronik sinkt der *absolute* Strombedarf allerdings weniger stark, und zwar bis 2030 um 7 bis 11 % und bis 2050 um 26 %.<sup>30</sup>

In den Bereichen **Kühlen, Gefrieren, Spülen, Waschen und Trocknen** können nach Einschätzung der Szenariostudien, die hierzu Aussagen machen (BMW i 2010; UBA 2009b; WWF 2009), in den nächsten Jahrzehnten signifikante technische Potenziale zur Verringerung des Strombedarfs realisiert werden. Gegenüber 2005 könnte der *spezifische* Strombedarf dieser Geräte demnach bis 2030 um rund 30 bis 50 % und bis 2050 – mit teilweise revolutionären Technologien (beispielsweise wasserfreie Waschmaschinen und Magnet-Stromkühlschränke) – um etwa 60 bis 80 % gesenkt werden.<sup>31</sup> Da der erwartete Anstieg bei der Geräteanzahl in diesen Bereichen nicht so hoch liegt wie im Bereich der Informations- und Unterhaltungselektronik, gehen auch die *absoluten* Stromverbräuche in den Szenarien deutlich zurück gegenüber 2005, und zwar bis 2030 um 20 (UBA 2009b) bis 45 % (WWF 2009) und bis 2050 um rund 65 % (WWF 2009).

In Bezug auf den spezifischen Energieverbrauch für den Bereich **Kochen** erwarten die betrachteten Studien (EnBW et al. 2009; UBA 2009b; WWF 2009) in ihren Klimaschutzszenarien etwas moderatere Senkungen. Gegenüber 2005 verringert sich der *spezifische* Endenergiebedarf der eingesetzten Elektroherde – nicht zuletzt aufgrund einer steigenden Durchdringung effizienter Induktionsherde – um rund 20 bis 25 % bis 2030 und um 25 % (EnBW et al. 2009) bis 40 % (WWF 2009) bis 2050. Gasherde werden nach WWF (2009) in ähnlichem Maße effizienter, die Studien nehmen allerdings einen weiter sinkenden Anteil an Gasherden an. Im Wesentlichen aufgrund der teilweisen Substitution von Gasherden durch Elektroherde verringert sich der *absolute* Strombedarf für das Kochen nach WWF (2009) weniger stark als der spezifische Strombedarf, nämlich gegenüber 2005 um etwa 20 % bis 2030 und um etwa 37 % bis 2050. In der Studie im Auftrag von EnBW et al. (2009) geht der Strombedarf bis 2050 sogar um rund 45 % zurück, was allerdings auch daran liegt, dass hier ein besseres Nutzerverhalten angenommen wird, das zu einem effizienteren Kochen führt.

Der **gesamte Strombedarf** der Privathaushalte könnte den Klimaschutzszenarien zufolge gegenüber 2005 um rund 20 bis 25 % bis 2030 und um 40 bis 45 % bis 2050 reduziert werden. Soll ein solcher Reduktionspfad realisiert werden, so müssen die Potenziale der technischen Energieeffizienz ausgenutzt werden. Eine stärkere Markt-

---

<sup>30</sup> In der Studie von EnBW et al. (2009) sind Informations- und Kommunikationstechnologien zusammengefasst, es fehlen also die Unterhaltungstechnologien. Ebenfalls finden sich keine Angaben zur Entwicklung des spezifischen Stromverbrauchs, allerdings steigt der absolute Verbrauch in diesem Bereich gegenüber 2005 bis 2030 um rund 60 % an, bevor er bis 2050 wieder etwas sinkt (auf etwa +35 % gegenüber 2005). D. h. Effizienzverbesserungen können den verbrauchssteigernden Effekt einer höheren Geräteausstattung demnach nicht kompensieren.

<sup>31</sup> Eine Ausnahme stellen Geschirrspüler dar, deren möglichen zukünftigen spezifischen Einsparungen niedriger eingeschätzt werden (ca. -25 % bis 2030 und -40 bis -45 % bis 2050).



durchdringung der jeweils effizientesten Geräte auf dem Markt ist eine der wichtigsten Voraussetzungen dafür.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die privaten Haushalte in NRW der deutschen Verbrauchsstruktur im Wesentlichen entsprechen und somit diese Erkenntnisse aus nationalen Untersuchungen auf NRW übertragen werden können. Tabelle 14 fasst dementsprechend die aus den verschiedenen Klimaschutzszenarien für Deutschland abgeleiteten Minderungspfade des spezifischen sowie des absoluten Strombedarfs für die Privathaushalte in NRW zusammen.

**Tabelle 14: Mögliche Reduktion des spezifischen und des absoluten Strombedarfs in den Privathaushalten in NRW in verschiedenen Anwendungsbereichen**

Anwendungsbe- reich(e)	Minderungsbezug	Minderung in 2030	Minderung in 2050
Informations- und Unterhaltungselektronik	Spezifischer Strombedarf in 2005	ca. 30 bis 40 %	ca. 50 bis 60 %
Kühlen, Gefrieren, Spülen, Waschen, Trocknen		ca. 30 bis 50 %	ca. 60 bis 80 %
Kochen		ca. 20 bis 25 %	ca. 25 bis 40 %
Informations- und Unterhaltungselektronik	Absoluter Strombedarf in 2005	ca. 5 bis 10 %	ca. 20 bis 30 %
Kühlen, Gefrieren, Spülen, Waschen, Trocknen		ca. 20 bis 45 %	ca. 40 bis 60 %
Kochen		ca. 20 %	ca. 35 bis 45 %
ALLE (inkl. „Rest“)		ca. 20 bis 25 %	ca. 40 bis 45 %

#### 4.6.3. Verhaltensänderungen bzw. Änderungen der Konsummuster

Durch eine bewusste Entscheidung zur Reduktion bzw. Änderung des eigenen Waren- und Lebensmittelkonsums können Privathaushalte den eigenen Strom-, Brennstoff- und Treibstoffverbrauch gegenüber einer Referenzentwicklung reduzieren. Zudem können indirekte THG-Emissionen in der Industrie, dem Handel, dem Verkehr und der Land-

wirtschaft vermieden werden. So könnte beispielsweise die Anzahl der technischen Geräte im Haushalt reduziert werden, auf den Besitz eines Autos könnte z. T. verzichtet werden und in der Ernährung könnte der Anteil von Fleisch und Milchprodukten reduziert werden.<sup>32</sup> Verhaltensänderungen ergänzen und verstärken die anderen Klimaschutzoptionen. Wie bereits gezeigt wurde, kann der Anstieg von Geräteanzahlen die erwünschten Effizienzeffekte teilweise kompensieren. Auch die Effekte der Gebäudesanierung können aufgrund zunehmender Gebäudefläche pro Kopf eingeschränkt werden. Diese Effekte werden als Rebound- und Wachstumseffekte beschrieben (vgl. Thomas 2012). Es benötigt z. B. selbstverständlich auch im Passivhaus weniger Energie, 40 m<sup>2</sup> Wohnfläche pro Kopf zu beheizen und zu beleuchten, als 60 m<sup>2</sup> (Thomas 2012, S. 11).

Weder für NRW noch für Deutschland liegen jedoch allgemeingültige Quantifizierungen der absoluten Energie- oder THG-Minderungen eines entsprechenden Wandels in (Teilen) der Gesellschaft vor. Die meisten der vorliegenden Szenariostudien vernachlässigen sozialen Wandel grundsätzlich und berücksichtigen Reboundeffekte nicht.

Das auch an anderer Stelle bereits zitierte „Szenario 3“ der Studie im Auftrag von EnBW et al. (2009) liefert jedoch eine grobe Abschätzung des realisierbaren Potenzials von Verhaltensänderungen, die auf Energieeinsparungen abzielen. Demnach könnte der direkte Energiebedarf der Privathaushalte im Jahr 2050 bei den dort angenommenen Verhaltensänderungen rund 10 % niedriger liegen als in einer Referenzentwicklung mit identischer Technologie aber ohne Verhaltensänderungen. Diese Minderung des Energiebedarfs wird unter anderem durch eine Reduktion der durchschnittlichen Raumtemperatur der Gebäude während der Heizperiode um 1 °C erreicht, wodurch der Heizenergiebedarf um 6 % sinkt.

Im Falle einer Halbierung des pro-Kopf-Fleischkonsums bis 2030 rechnen Wiegmann et al. (2005) mit einer Minderung der ernährungsbedingten THG-Emissionen um 7 %. Popp et al. (2010) unterstellen weitergehende Änderungen der Ernährungsweise und gehen von einer möglichen Reduktion von mehr als 50 % des landwirtschaftlich bedingten Ausstoßes der stark klimawirksamen Gase Lachgas (N<sub>2</sub>O) und Methan (CH<sub>4</sub>) aus, wenn der weltweite Fleischkonsum bis 2055 um rund drei Viertel reduziert wird.

---

<sup>32</sup> Auf den ersten Blick scheint eine Reduktion des Konsums unwahrscheinlich – warum sollte jemand aus freien Stücken weniger konsumieren und besitzen? Dennoch lässt sich ein Trend hin zu weniger konsumorientierten Denk- und Handlungsmustern feststellen. In einer Umfrage im Auftrag der „Bertelsmann-Stiftung“ bestätigt sich diese Tendenz. 60 % der befragten Deutschen gaben an, nicht an eine Steigerung der persönlichen Lebensqualität als Folge von Wirtschaftswachstum zu glauben (TNS Emnid 2012). 80 % stimmten der Aussage zu, dass jeder bei sich selbst anfangen und sich fragen müsse, „ob mehr Konsum und mehr wirtschaftliches Wachstum das Wichtigste ist“ (ebd. S. 7). Verhaltensänderungen können daher jenseits der „Verzichtsrhetorik“ als Befreiung von Ballast und Entrümpelung verstanden werden.

Das Klimaschutzszenario des WWF (2009) geht davon aus, dass in Deutschland pro Kopf im Jahr 2050 nur noch ein Drittel so viel Fleisch wie im Jahr 2005 konsumiert wird.

Eine weitere Möglichkeit zur Reduktion der indirekten THG-Emissionen der Ernährung stellt eine Reduktion der Lebensmittelverschwendung dar. Verbraucherinnen und Verbraucher unterschätzen die Menge der Lebensmittelabfälle zumeist. Durch die Erzeugung später vernichteter Lebensmittel werden in der EU einer Studie (Europäische Kommission 2010) zufolge mindestens 170 Mio. t CO<sub>2</sub>-eq/Jahr emittiert. Proportional umgerechnet auf die rund 18 Millionen Einwohnerinnen und Einwohner in NRW entfallen damit rund 6 Mio. t CO<sub>2</sub>-eq/Jahr bzw. 0,3 bis 0,4 t CO<sub>2</sub>-eq/Jahr auf die Vernichtung von Lebensmitteln aus NRW. Knapp die Hälfte der Emissionen ist der Studie zufolge auf das unmittelbare Verhalten der Haushalte zurückzuführen, die restlichen Emissionen auf Entscheidungen in Herstellung, Handel und Vertrieb der Lebensmittel. Bei einer Reduktion der Verschwendung der Lebensmittel um 50 bis 75 % durch Verhaltensänderungen der Privathaushalte könnte demnach etwa 0,1 bis 0,2 t CO<sub>2</sub>-eq/Jahr und Person (Institut für Nachhaltige Ernährung und Ernährungswirtschaft 2012) vermieden werden, was rund 7 % der durch Ernährung verursachten durchschnittlichen deutschen Pro-Kopf-THG-Emissionen darstellt (UBA 2011).

Wichtig ist: Konsumreduktion ist keine Einbahnstraße, sondern geht mit anderen Lebensstilen und neuen gesellschaftlichen Praktiken einher. Beispiel Auto: Hier kann durch die bereits etablierte Strategie „Nutzen statt Besitzen“, also Car-Sharing, eine intensivere Nutzung eines insgesamt verkleinerten Automobilbestands erreicht werden.

Auch in anderen Konsumbereichen sind Sharing-Modelle denkbar, etwa in den Bereichen Gefrieren, Waschen und Trocknen.

Tabelle 15 fasst die – hier nur grob abschätzbaren – realisierbaren Energie- und THG-Minderungspotenziale von Verhaltensänderungen der Privathaushalte zusammen.

**Tabelle 15: Realisierbaren Energie- und THG-Minderungspotenziale in verschiedenen Bereichen durch Verhaltensänderungen der Privathaushalte in NRW<sup>33</sup>**

Bereich	Minderungsbezug	Minderung in 2030	Minderung in 2050
Strombedarf	Energiebedarf bei Referenzentwicklung	ca. 5 %	ca. 5 bis 10 %
Heizenergiebedarf		ca. 5 %	ca. 5 bis 10 %
Ernährung (Umstellung der Ernährungsweise)	THG-Emissionen der Landwirtschaft bei Referenzentwicklung	ca. 5 %	ca. 10 %
Ernährung (Reduktion der Verschwendung von Lebensmitteln)		ca. 5 bis 10 %	ca. 5 bis 10 %

Die Strategien der Erhöhung der Energieeffizienz auf der einen und der Umsetzung von Verhaltensänderungen auf der anderen Seite lassen sich gut miteinander kombinieren. Bei vollständigem Ausschöpfen der Geräteeffizienzpotenziale – bei durchschnittlichem Ausstattungsgrad und zweckorientierter Nutzung – zeigt sich, dass der Stromverbrauch gegenüber dem gegenwärtigen deutschen Durchschnittswert bereits um zwei Drittel reduziert wird, unter Berücksichtigung von Reboundeffekten jedoch nur um ein Drittel. (Das entspricht einem direkten Reboundeffekt von rund 30 %.) Wird jedoch ein konsequent energiesparendes Konsum- und Nutzungsverhalten unterstellt, lassen sich Reboundeffekte weitgehend vermeiden und weitere Energie einsparen. Der absolute Stromverbrauch eines solchen Haushalts beträgt dann nur noch ein Fünftel des Durchschnittswerts (Brischke und Spengel 2011).

## 5. Lücken in der Potenzialdarstellung

Die Auswertung der THG-Minderungs- und Effizienzpotenziale in NRW dient dem Ziel, den Akteuren im Partizipationsprozess des Klimaschutzplanes einen Überblick über die aus Sicht des Wuppertal Instituts bestehenden Potenziale zu vermitteln. Aus der Übersicht in den vorhergehenden Kapiteln ist deutlich geworden, dass in vielen Bereichen die Datenlage in NRW nicht ausreichend ist. Dies ist in den Fällen, in denen verlässliche Daten auf Bundesebene vorliegen und diese nachvollziehbar auf NRW

<sup>33</sup> Nicht alle denkbaren Verhaltensänderungen und damit verbundenen Energie- und THG-Minderungspotenziale werden hier aufgeführt und abgeschätzt.

herunter gebrochen werden können, nicht problematisch. Es gibt aber einige Bereiche, in denen dies nicht möglich ist, entweder weil selbst auf Bundesebene die Daten nicht vorliegen oder die Strukturen in NRW von der Bundesebene deutlich abweichen und so eine Übertragbarkeit nur eingeschränkt möglich ist. In diesem Kapitel werden Empfehlungen ausgesprochen, welche Potenzialuntersuchungen – unter Berücksichtigung der Tatsache, dass zusätzliche Untersuchungen noch in diesem Jahr abgeschlossen werden müssen und nur ein beschränktes Budget dafür vorhanden ist – durchgeführt werden sollten. Ziel ist es, auf Basis des hier vorliegenden Potenzialscreenings und der noch erfolgenden Potenzialuntersuchungen den Stakeholdern im Beteiligungsprozess ein möglichst umfassendes Bild über die THG-Minderungspotenziale in ihren Sektoren zu ermöglichen und die Diskussion anhand dokumentierter Untersuchungen sachlich zu führen.

## 5.1. Umwandlungssektor

Für die Abschätzung des mittel- bis langfristigen Emissionsminderungspotenzials im Umwandlungssektor sind genauere Kenntnisse über die Potenziale der Nutzung erneuerbarer Energien für die Stromerzeugung von besonders hoher Bedeutung. Entsprechende Studien werden derzeit im LANUV bearbeitet und sollten im Laufe des Jahres/Anfang nächsten Jahres vorliegen. Sobald die Potenzialdaten vorliegen, könnte es sinnvoll sein zu untersuchen, wie schnell ein Umbau hin zu einem primär auf erneuerbaren Energien basierten Stromsystem – in Zusammenspiel mit einer verstärkten Nutzung von KWK-Anlagen – unter Berücksichtigung möglicher infrastruktureller Hemmnisse (z. B. im Bereich der Stromtransport- und -verteilnetze) und politisch-ökonomischer Hemmnisse (z. b. durch noch nicht abgeschriebene Großkraftwerke) möglich ist.

Empfehlung: Studie zur Ermittlung des notwendigen Zeitraumes zum Umbau des Stromsystems in NRW zu einem primär auf erneuerbaren Energien beruhenden Stromsystem

## 5.2. Industrie

Die analysierten Szenariostudien für die Industrie geben – aus bundesdeutscher Perspektive – Anhaltspunkte, in welchen Branchen über welche Maßnahmen Reduktionen der Treibhausgasemissionen in den kommenden Jahren und Jahrzehnten möglich sind. Allerdings gibt es mehrere Einschränkungen, die zu einer kompletten Potenzialanalyse fehlen. Erstens konzentrieren sich die meisten Studien auf die nationale Ebene. Es fehlen umfassende Untersuchungen speziell für das Land NRW. Zweitens beinhalten

die analysierten Studien zwar häufig Angaben zu den zentralen technischen Maßnahmen zur Energieeinspar- bzw. Emissionsminderung für einzelne Branchen oder den gesamten Industriesektor, jedoch werden diese technischen Maßnahmen nicht im Einzelnen mit konkreten Minderungspotenzialen versehen. Drittens enthalten die Studien für die meisten Branchen deutlich abweichende Angaben bezüglich der entsprechenden Reduktionspotenziale.

Aus diesen Gründen sind weitergehende Untersuchungen, die möglichst auch die landesspezifischen Gegebenheiten widerspiegeln, von hoher Bedeutung, um technisch und ökonomisch realisierbare Emissionsminderungspfade für die nordrhein-westfälische Industrie ableiten zu können. Dabei sollten insbesondere die folgenden drei Branchen, die Endenergiebedarf und THG-Emissionen in NRW wesentlich bestimmen, im Fokus stehen:

- Chemieindustrie
- Eisen- und Stahlindustrie
- Zement-/Kalk-/Glaserstellung

Wie bereits erwähnt, besteht ein Nachteil der in dem vorliegenden Bericht analysierten Studien in der Tatsache, dass zwar häufig zentrale technische Maßnahmen zur Energieeinspar- bzw. Emissionsminderung für einzelne Branchen oder den gesamten Industriesektor genannt werden, diese technischen Maßnahmen aber nicht im Einzelnen mit konkreten Minderungspotenzialen versehen werden. Dies erschwert die Abschätzung, über welche Maßnahmen innerhalb welchen Zeitraums Emissionsminderungen in einzelnen Branchen möglich sind. Dieses Wissen ist allerdings zentral für die Diskussion innerhalb des Industrie-Arbeitskreises über die möglichen Klimaschutzbeiträge einzelner Industriebranchen. Es ist daher empfehlenswert, zumindest für die drei zuvor genannten Branchen, tiefergehende (technische) Potenzialstudien durchzuführen und diese für Deutschland und z. T. auch die Welt vorliegenden Studien möglichst mit spezifischen Kenntnissen der Besonderheiten der entsprechenden nordrhein-westfälischen Industriebranchen (ggf. über Interviews mit Expertinnen und Experten) abzugleichen.

Am Ende dieser detaillierten Branchenanalysen könnten verschiedene Maßnahmenbündel abgeleitet werden, die sich nach den Kriterien der Wirtschaftlichkeit und der Umsetzungsgeschwindigkeit unterscheiden. Diese Maßnahmen werden unterteilt in vier Kategorien:

1. Weitere Effizienzsteigerungen
2. Neue Verfahren und Prozesse
3. Erneuerbare Rohstoffe
4. CCS

In der ersten Kategorie sind eine Reihe von relativ schnell und günstig umsetzbaren Maßnahmen mit begrenztem THG-Reduktionspotenzial zusammengefasst (z. B. inkrementelle Verbesserungen der Energie- und Materialeffizienz). In der zweiten Kategorie befinden sich (gegenwärtig noch) relativ teure Optionen, die in Verbindung mit vorherigen Maßnahmen substantiellere THG-Minderungen erlauben (z. B. Nutzung regenerativ erzeugten Wasserstoffs oder völlig neuartige Verfahren). In der dritten Kategorie sind mittel- bis langfristige Maßnahmen gebündelt, die einen Energieträgerwechsel von fossilen zu erneuerbaren Rohstoffen bzw. Strom vorsehen, ggf. über den Zwischenschritt Erdgas als CO<sub>2</sub>-ärmerer Energieträger anstelle von Kohle. Die vierte Kategorie beinhaltet die CCS-Technologie, die zur Verringerung von Emissionen eingesetzt werden könnte, die durch die vorherigen Maßnahmenkategorien nicht eingespart werden konnten (insbesondere Prozessemissionen). Ein solcher Aufbau würde sicherlich die Diskussion innerhalb des Industrie-Arbeitskreises strukturieren und vereinfachen.

Empfehlung: Anfertigung technischer Potenzialstudien in ausgesuchten industriellen Branchen in NRW und Ermittlung von günstigen und schnell umsetzbaren THG-Minderungsmaßnahmen. Entsprechende technische Potenzialstudien sind allerdings relativ zeit- und ressourcenintensiv, wenn sie umfassend und differenziert ausgestaltet werden sollen. Als weitere Möglichkeit könnte eine Auswertung der vorliegenden technischen Potenzialstudien im Industriesektor mit globalem (z. B. IEA 2012), europäischem und nationalem Fokus in ausgesuchten industriellen Branchen in einem höheren Detailgrad erfolgen, als dies im Rahmen der vorliegenden Arbeit möglich war, die speziell nach NRW-spezifischen Potenzialstudien gesucht hat und mangels ausreichender Literatur auf entsprechende Studien für Deutschland zurückgegriffen hat. Die so ermittelten Potenziale könnten dann (grob) auf NRW heruntergebrochen werden. Auch hier sollte basierend auf den technischen Potenzialstudien eine Identifizierung und Quantifizierung von wirtschaftlichen und schnell umsetzbaren THG-Minderungsmaßnahmen erfolgen.

Diese alternative Option wäre schneller und günstiger durchzuführen, hätte allerdings gegenüber eigenen NRW-spezifischen technischen Potenzialstudien einzelner Branchen den Nachteil, dass mögliche Abweichungen der jeweiligen Produktionsstrukturen in NRW vom bundesdeutschen, europäischen oder globalen Durchschnitt nicht angemessen berücksichtigt werden könnten. Sinnvoll wäre möglicherweise eine Kombination beider Vorgehensweisen, indem in begrenztem Umfang technische Potenzialstudien für ausgewählte Industriebranchen in NRW erstellt werden, und diese durch vorliegende Studien für Deutschland, Europa und die Welt ergänzt werden.

Wünschenswert wäre es dabei vor dem Hintergrund des anstehenden Prozesses im Zusammenhang mit dem Klimaschutzplan auch, eine stärkere Phasierung der Potenziale einzelner Industriebranchen (d. h. Unterteilung der verschiedenen Potenziale gemäß Zeitverlauf) abzuleiten, als dies in den hier analysierten Studien erfolgt. So könnte unterschieden werden zwischen solchen Potenzialen, für die Maßnahmen existieren, die kurz- bis mittelfristig (z. B. bis 2030) umgesetzt werden können und solchen Maßnahmen, die perspektivisch erst danach realisiert werden können (z. B. weitreichender Einsatz von Wasserstofftechnologien).

### **5.3. Bauen und Wohnen/GHD**

Für den Bereich Bauen und Wohnen bzw. GHD sind aus heutiger Sicht keine zusätzlichen Potenzialuntersuchungen notwendig. Der Grund dafür liegt vor allem darin, dass die Ergebnisse der bundesdeutschen Potenzialuntersuchungen im Wesentlichen gut auf NRW übertragen werden können. Es gibt einzelne Bereiche, in denen grundsätzlich weitere Potenzialuntersuchungen sinnvoll sind, beispielsweise die Möglichkeiten der Kerndämmung in zweischaligem Mauerwerk, was insbesondere im Bestand des Münsterlandes eine Option ist. Angesichts des knappen Zeitplanes und Budgets im Klimaschutzplan sind die Ressourcen in anderen Sektoren jedoch sinnvoller aufzueheben.

### **5.4. Verkehr**

Für die Ermittlung von Potenzialen im Verkehr gibt es kreisscharfe Prognosen zur Entwicklung des Personen- und Güterverkehrs bis 2025 (Intraplan Consult GmbH und Beratergruppe Verkehr und Umwelt 2007). Für die langfristige Betrachtung von Entwicklungen über 2035 hinaus fehlen solche Untersuchungen. Dies gilt auch für die Emissionen aus dem Luftverkehr. Das wird insbesondere wichtig, da in diesem Zeitraum technische Entwicklungen möglich sind, die in der kurzfristigen Perspektive



noch nicht zum tragen kommen (wie z. B. eine Wasserstoffwirtschaft), aber schon heute Auswirkungen auf Infrastrukturentscheidungen haben können.

Empfehlung: Studie zu der möglichen Entwicklung des Personen- und Güter sowie des Luftverkehrs in NRW bis 2050 mit besonderer Berücksichtigung von Technologieänderungen und Systembrüchen.

## **5.5. Landwirtschaft**

Im Sektor Landwirtschaft ist die Forcierung der Umstellung der konventionellen Landwirtschaft auf den Ökolandbau betrachtungswert. Damit ist unter anderem eine deutliche Verminderung des synthetischen Düngereinsatzes verbunden. Es sollten sowohl die möglichen Emissionsminderungspotenziale abgeschätzt sowie die mit der Umstellung verbundenen möglichen Struktureffekte in NRW betrachtet werden. Wie in Kapitel 4.5 beschrieben, können diese Einsparpotenziale in der Modellierung lediglich nachrichtlich genutzt werden, können aber wertvolle Hinweise über Richtung und Größenordnung der zu erwartenden THG-Minderungen geben und damit eine Orientierungshilfe für die Formulierung von Minderungsmaßnahmen sein.

Empfehlung: Ermittlung von Emissionseinsparpotenzialen durch verstärkte Umstellung von konventioneller Landwirtschaft auf Ökolandbau (Erweiterung der Fläche auf mindestens 25 % gegenüber heute), wobei bei einer mit dieser Strategie möglicherweise verbundenen Reduktion des landwirtschaftlichen Ertrages die THG-Effekte einer kompensierenden zusätzlichen Flächennutzung bzw. Landwirtschaft außerhalb von NRW zu berücksichtigen sind.

## **5.6. Private Haushalte**

Quantifizierbare Treibhausgasminderungspotenziale sind im Sektor „Private Haushalte“ lediglich für Stromanwendungen darstellbar. Dies liegt daran, dass wichtige THG-Minderungspotenziale dieser Verbrauchergruppe – wie die Gebäudesanierung oder der Personenverkehr – in anderen Arbeitsgruppen verankert sind. Minderungspotenziale in wichtigen Bereichen wie der Ernährung und der Produktverwendung werden in der Literatur aus Daten- und Modellierungsgründen in der Regel nicht quantifiziert. Diese Themen können daher auch in der vorliegenden Arbeit nur qualitativ betrachtet werden.

Die Einsparpotenziale von elektrischen Anwendungen im Haushaltbereich sind gut untersucht und die nationalen Daten gut auf NRW herunterzurechnen, so dass im Rahmen des Klimaschutzplans keine weiteren Potenzialuntersuchungen notwendig sind.

Die Klimaschutzpotenziale von Verhaltensänderungen, Bewusstseinsbildung und Kommunikation sind bisher jedoch nicht wissenschaftlich belastbar untersucht worden.

## **6. Umgang mit Ressourceneffizienz und Ressourcenschutz**

Die Betrachtung der Ressourceneffizienz und des Ressourcenschutzes sind Bestandteil des Entwurfes des Klimaschutzgesetzes (Landesregierung NRW 2011) und von daher auch Bestandteil des Klimaschutzplanes. Innerhalb des Klimaschutzplanes werden allerdings nur die energetischen Ressourcen betrachtet, darüber hinausgehende Betrachtungen. Da die energetischen Ressourcen in den einzelnen Sektoren und im Modell explizit betrachtet werden ist eine darüber hinausgehende Darstellung nicht notwendig.

## 7. Literatur

- Anderer, P.; Dumont, U.; Kolf, R. (2007): Das Wasserkraftpotenzial in Nordrhein-Westfalen. *Wasser und Abfall*, 7-8.
- BMU (2010): Leitstudie 2010 – Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global (Studie). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Abgerufen von [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2010\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2010_bf.pdf).
- BMU (2011): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global: „Leitstudie 2010“. Abgerufen von [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2010\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2010_bf.pdf).
- BMU (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global (Studie). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Abgerufen von [http://erneuerbare-energien.de/erneuerbare\\_energien/doc/48514.php](http://erneuerbare-energien.de/erneuerbare_energien/doc/48514.php).
- BMWi (2010): Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung (Nr. 12/10). Basel/Köln/Osnabrück: ewi, gws, prognos.
- BMWi (2011): Energieszenarien 2011. Basel/Köln/Osnabrück: Prognos AG, EWI, GWS. Abgerufen von [http://www.prognos.com/fileadmin/pdf/publikationsdatenbank/11\\_08\\_12\\_Energieszenarien\\_2011.pdf](http://www.prognos.com/fileadmin/pdf/publikationsdatenbank/11_08_12_Energieszenarien_2011.pdf).
- Brischke, L.-A.; Spengel, L. (2011): Ein Fall für zwei. Effizienz und Suffizienz. *Politische Ökologie*, 126(29)86–93.
- Dena (2010): dena-Sanierungsstudie. Teil 1: Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierung im Mietwohnungsbestand. Begleitforschung zum dena-Projekt „Niedrigenergiehaus im Bestand“. Berlin.
- Dena (2012): dena-Sanierungsstudie. Teil 2: Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierung in selbstgenutzten Wohngebäuden. Begleitforschung zum dena-Projekt „Niedrigenergiehaus im Bestand“. Berlin.
- DIW (2010): Vergleich der Bundesländer: Analyse der Erfolgsfaktoren für den Ausbau der Erneuerbaren Energien 2010 Indikatoren und Ranking. Berlin / Stuttgart. Abgerufen von [http://www.unendlich-viel-energie.de/uploads/media/BL-Vergleich\\_EE\\_2010\\_Endbericht\\_final\\_online.pdf](http://www.unendlich-viel-energie.de/uploads/media/BL-Vergleich_EE_2010_Endbericht_final_online.pdf).
- Doll, C.; Matthes, F. C.; Hansen, P.; Roser, A.; Ziesing, H.-J. (2012): Ermittlung der Klimaschutzwirkung des Integrierten Energie- und Klimaschutzprogramms der Bundesregierung IEKP und Vorschlag für ein Konzept zur kontinuierlichen Überprüfung der Klimaschutzwirkung des IEKP - Arbeitspaket 1: Qualitative

- Einschätzung der Instrumente im Integrierten Energie- und Klimaschutzprogramm (IEKP) (Nr. 01/2012). Climate Change. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Abgerufen von <http://www.uba.de/uba-info-medien/4253.html>.
- Eikmeyer, B.; Klobasa, M.; Toro, F.; Menzler, G. (2011): Potenzialerhebung von Kraft-Wärme- Kopplung in Nordrhein-Westfalen: Zusammenfassung. Bremen: Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur-und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.
- EnBW; E.ON Energie; RWE Power; Vattenfall Europe (2009): Energiezukunft 2050: Teil II - Szenarien. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. Abgerufen von [http://www.ffe.de/download/berichte/Endbericht\\_Energiezukunft\\_2050\\_Teil\\_I.pdf](http://www.ffe.de/download/berichte/Endbericht_Energiezukunft_2050_Teil_I.pdf).
- EnergieAgentur NRW (2011): Erhebung „Wo im Haushalt bleibt der Strom?“ Abgerufen von [http://www.energieagentur.nrw.de/\\_database/\\_data/datainfopool/erhebung\\_wo\\_bleibt\\_der\\_strom.pdf](http://www.energieagentur.nrw.de/_database/_data/datainfopool/erhebung_wo_bleibt_der_strom.pdf).
- EnergieAgentur.NRW (2011): Solar-Atlas NRW. Abgerufen Oktober 23, 2012 von <http://www.energieagentur.nrw.de/broschueren-archiv/solar-atlas-nrw-676.asp>.
- Europäische Kommission (2010): Preparatory study on food waste across EU 27 (Technical Report). Abgerufen von [ec.europa.eu/environment/eussd/pdf/bio\\_foodwaste\\_report.pdf](http://ec.europa.eu/environment/eussd/pdf/bio_foodwaste_report.pdf).
- EUtech (2008): NRW-Klima2020 - Beitrag Nordrhein-Westfalens zur Erreichung des nationalen Klimaschutzziels. Aachen: Fraktion Bündnis 90/Die Grünen im Landtag NRW.
- Fraunhofer ISI (2010): Energietechnologien 2050 – Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung (Politikbericht). Karlsruhe.
- Fraunhofer ISI; IREES; Hassan, A. (2011): Möglichkeiten, Potenziale, Hemmnisse und Instrumente zur Senkung des Energieverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen von industriellen Branchentechnologien durch Prozessoptimierung und Einführung neuer Verfahrenstechniken (Schlussbericht Nr. Forschungs- und Entwicklungsvorhaben FKZ 3709 46 130). Karlsruhe, Berlin: Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI), IREES GmbH, TU Berlin.
- Geologischer Dienst NRW (o.J.): Erdwärme nutzen: Geothermiestudie liefert Planungsgrundlage. Krefeld.
- Greenpeace (2009): Klimaschutz: Plan B 2050 - Energiekonzept für Deutschland (500. Aufl.). Hamburg, Aachen. Abgerufen von [http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user\\_upload/themen/klima/Plan\\_B\\_2050\\_lang.pdf](http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/klima/Plan_B_2050_lang.pdf).
- Hermann, H.; Matthes, F. C.; Athmann, U. (2012): Potenziale und Chancen der Technologie zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung und –Ablagerung (CCS) für industrielle Prozessemissionen. Berlin, Darmstadt.

- von Hirschhausen, C. von; Oei, P.-Y.; Gerbaulet, C.; Haftendorn, C.; Kemfert, C. (2012): Energiestrategie Brandenburg 2030 - Erneuerbare forcieren, Braunkohleausstieg fair gestalten. *DIW Wochenbericht*, (11)10–17.
- IFEU; Fraunhofer ISI; Prognos; gws; IREES; Orange; IfnE; Fraunhofer ISE - ZEE (2011): Energieeffizienz: Potenziale, volkswirtschaftliche Effekte und innovative Handlungs- und Förderfelder für die Nationale Klimaschutzinitiative In Zusammenarbeit (Endbericht des Projektes „Wissenschaftliche Begleitforschung zu übergreifenden technischen, ökologischen, ökonomischen und strategischen Aspekten des nationalen Teils der Klimaschutzinitiative“). Heidelberg, Karlsruhe, Berlin, Osnabrück, Freiburg. Abgerufen von [www.ifeu.de/energie/pdf/NKI\\_Endbericht\\_2011.pdf](http://www.ifeu.de/energie/pdf/NKI_Endbericht_2011.pdf).
- Institut für Nachhaltige Ernährung und Ernährungswirtschaft (2012): Verringerung von Lebensmittelabfällen – Identifikation von Ursachen und Handlungsoptionen in Nordrhein-Westfalen. Münster: Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Abgerufen von [https://www.fh-muenster.de/isun/downloads/Studie\\_Verringerung\\_von\\_Lebensmittelabfaellen.pdf](https://www.fh-muenster.de/isun/downloads/Studie_Verringerung_von_Lebensmittelabfaellen.pdf).
- Intraplan Consult GmbH; Beratergruppe Verkehr und Umwelt (2007): Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025 (Nr. FE-Nr. 96.0857/2005). München/Freiburg.
- IÖW (2008): Klimawirkungen der Landwirtschaft in Deutschland. Schriftenreihe des IÖW 186/08. Berlin.
- IÖW (2010): Erschließbare Energieeinsparpotenziale im Ein- und Zweifamilienhausbestand. Eine Untersuchung des energetischen Ist-Zustands der Gebäude, aktueller Sanierungsraten, theoretischer Einsparpotenziale sowie deren Erschließbarkeit. Berlin.
- IT.NRW (2009): Energiebilanz und CO<sub>2</sub>-Bilanz in Nordrhein-Westfalen 2007. Information und Technik Nordrhein-Westfalen.
- IT.NRW (2011): Energiebilanz und CO<sub>2</sub>-Bilanz in Nordrhein-Westfalen 2009 (Nr. E443200900). Statistischer Bericht. Düsseldorf: Information und Technik Nordrhein-Westfalen.
- Landesregierung NRW (2011): Gesetz zur Förderung des Klimaschutzes in Nordrhein-Westfalen - Entwurf der Landesregierung. Düsseldorf. Abgerufen von [http://www.umwelt.nrw.de/klima/pdf/gesetz\\_klimaschutz\\_nrw.pdf](http://www.umwelt.nrw.de/klima/pdf/gesetz_klimaschutz_nrw.pdf).
- LANUV NRW (2011): Treibhausgas-Emissionsinventar Nordrhein-Westfalen 2009. Recklinghausen: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz. Abgerufen von [http://www.lanuv.nrw.de/klima/pdf/Treibhausgas\\_Emissionsinventar.pdf](http://www.lanuv.nrw.de/klima/pdf/Treibhausgas_Emissionsinventar.pdf).
- LANUV NRW (2012a): Emissionsminderungspotentiale der Eisen- und Stahlindustrie in NRW (FB 75). Essen: LANUV NRW.
- LANUV NRW (2012b): Emissionsminderungspotentiale der Zementindustrie in NRW (FB 75). Essen: LANUV NRW.

- LANUV NRW (2012c): Treibhausgas-Emissionsinventar Nordrhein-Westfalen 2010. Recklinghausen: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz. Abgerufen von [http://www.lanuv.nrw.de/klima/pdf/Treibhausgas\\_Emissionsinventar.pdf](http://www.lanuv.nrw.de/klima/pdf/Treibhausgas_Emissionsinventar.pdf).
- Lübbert, D. (2007): CO<sub>2</sub>-Bilanzen verschiedener Energieträger im Vergleich – Zur Klimafreundlichkeit von fossilen Energien, Kernenergie und erneuerbaren Energien. Info-Brief. Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestags. Abgerufen von [http://www.bundestag.de/dokumente/analysen/2007/CO2-Bilanzen\\_verschiedener\\_Energietraeger\\_im\\_Vergleich.pdf](http://www.bundestag.de/dokumente/analysen/2007/CO2-Bilanzen_verschiedener_Energietraeger_im_Vergleich.pdf).
- McKinsey Deutschland (2007a): Kosten und Potentiale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland - Sektorperspektive Industrie. Berlin.
- McKinsey Deutschland (2007b): Kosten und Potentiale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland - Sektorperspektive Transport. Berlin.
- MKULNV (2011): Energie.Daten NRW 2011. Düsseldorf: Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Abgerufen von [http://www.umwelt.nrw.de/klima/pdf/broschuere\\_energiedaten\\_nrw\\_2011.pdf](http://www.umwelt.nrw.de/klima/pdf/broschuere_energiedaten_nrw_2011.pdf).
- MUNLV (2008): Ressourcen- und Klimaschutz in der Siedlungsabfallwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen. Zukünftige Potenziale und Entwicklungen. Düsseldorf: Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.
- NRW-SPD; Bündnis 90 / Die Grünen NRW (2010): Gemeinsam neue Wege gehen: Koalitionsvertrag. Düsseldorf. Abgerufen von [http://www.gruene.landtag.nrw.de/cms/default/dokbin/346/346937.der\\_rotgruene\\_koalitionsvertrag.pdf](http://www.gruene.landtag.nrw.de/cms/default/dokbin/346/346937.der_rotgruene_koalitionsvertrag.pdf).
- Popp, A.; Lotze-Campen, H.; Bodirsky, B. (2010): Food consumption, diet shifts and associated non-CO<sub>2</sub> greenhouse gases from agricultural production. *Global Environmental Change*, 20(3)451–462. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2010.02.001.
- Regionalverband Ruhr (2012): RVR analysiert regionales Potenzial der Solarenergie. Abgerufen Oktober 17, 2012 von <http://www.metropoleruhr.de/presse/pressemitteilungen/pressemitteilungen-detail/archive/2012/july/article/rvr-analysiert-regionales-potenzial-der-solarenergie.html>.
- Richwien, M.; Fishedick, M. (2012): Die Leitplanken des Beteiligungsverfahrens zur Erarbeitung des „Klimaschutzplan Nordrhein-Westfalen“. Gehalten auf der Auftaktveranstaltung für den „Klimaschutzplan Nordrhein-Westfalen“, Düsseldorf. Abgerufen von [http://www.klimaschutz.nrw.de/fileadmin/user\\_upload/documents/Klimaschutzplan\\_NRW\\_Auftakt\\_Vortraege.pdf](http://www.klimaschutz.nrw.de/fileadmin/user_upload/documents/Klimaschutzplan_NRW_Auftakt_Vortraege.pdf).
- RWI (2011): Die Klimavorsorgeverpflichtung der deutschen Wirtschaft – Monitoringbericht 2010. Essen.

- Schlesinger, M.; Lindenberger, D.; Lutz, C. (2010): Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung ( Nr. 12/10). Basel/Köln/Osnabrück: ewi, gws, prognos.
- Schlesinger, M.; Lindenberger, D.; Lutz, C. (2011): Energieszenarien 2011. Basel/Köln/Osnabrück: Prognos AG, EWI, GWS. Abgerufen von [http://www.prognos.com/fileadmin/pdf/publikationsdatenbank/11\\_08\\_12\\_Energieszenarien\\_2011.pdf](http://www.prognos.com/fileadmin/pdf/publikationsdatenbank/11_08_12_Energieszenarien_2011.pdf).
- Shell (2010): Shell LKW-Studie. Fakten, Trends und Perspektiven im Straßen-güterverkehr bis 2030. Hamburg/Berlin: Shell Deutschland Oil GmbH. Abgerufen von [http://www-static.shell.com/static/deu/downloads/aboutshell/our\\_strategy/truck\\_study/shell\\_truck\\_study\\_2030.pdf](http://www-static.shell.com/static/deu/downloads/aboutshell/our_strategy/truck_study/shell_truck_study_2030.pdf).
- Shell (2011): Shell Hauswärme-Studie: Nachhaltige Wärmeerzeugung für Wohngebäude, Fakten, Trends und Perspektiven. Hamburg: Shell Deutschland. Abgerufen von [http://www.hwwi.org/fileadmin/hwwi/Publikationen/Studien/Shell\\_Hauswaerme\\_Studie.pdf](http://www.hwwi.org/fileadmin/hwwi/Publikationen/Studien/Shell_Hauswaerme_Studie.pdf).
- Siemens (2011): Machbarkeitsstudie. Potentiale Erneuerbarer Energien im Regierungsbezirk Arnsberg. Aachen: Bezirksregierung Arnsberg. Abgerufen von <http://www.bezirksregierung-arnsberg.nrw.de/themen/m/machbarkeitsstudie/machbarkeitsstudie.pdf>.
- SRU (2011): Wege zur 100% erneuerbaren Stromversorgung (Sondergutachten). Berlin. Abgerufen von <http://www.umweltrat.de>.
- Thomas, S. (2012): Energieeffizienz spart wirklich Energie – Erkenntnisse zum Thema „Rebound-Effekte“. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 62(8).
- TNS Emnid (2012): Kein Wachstum um jeden Preis (Kurzbericht im Auftrag der Bertelsmann Stiftung).
- UBA (2007a): Klimaschutz in Deutschland: 40%-Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2020 gegenüber 1990. Dessau.
- UBA (2007b): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix. Dessau.
- UBA (2009a): Strategien für einen nachhaltigen Güterverkehr. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- UBA (2010a): Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen. Abgerufen von <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3997.pdf>.
- UBA (2010b): CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland. Mögliche Maßnahmen und ihre Minderungspotenziale. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Abgerufen von <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3773.pdf>.
- UBA (2011): CO<sub>2</sub>-Rechner. Abgerufen Oktober 17, 2012 von [http://uba.klimaktiv-co2-rechner.de/de\\_DE/page/](http://uba.klimaktiv-co2-rechner.de/de_DE/page/).

- UBA (Hrsg.) (2009b): Politiksszenarien für den Klimaschutz V - Auf dem Weg zum Strukturwandel. Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030. Climate Change. Dessau-Roßlau.
- Vallentin, D.; Dienst, C.; Schneider, C.; Zeiss, C. (2011): Entwicklung einer Sektorstrukturierung für Modellierungsarbeiten zum Klimaschutzplan NRW (Arbeitspapier). Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.
- Viebahn, P.; Esken, A.; Höller, S.; Luhmann, H.-J.; Pietzner, K.; Vallentin, D. (2010): RECCS plus - Regenerative Energien (RE) im Vergleich mit CO<sub>2</sub>-Abtrennung und -Ablagerung (CCS). Update und Erweiterung der RECCS-Studie (Abschlussbericht des Wuppertal Instituts im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit). Wuppertal, Berlin. Abgerufen von [www.wupperinst.org/CCS/](http://www.wupperinst.org/CCS/).
- vTI (2012): Studie zur Vorbereitung einer effizienten und gut abgestimmten Klimaschutzpolitik für den Agrarsektor ( Nr. Sonderheft 361). Braunschweig: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Abgerufen von [http://www.vti.bund.de/fileadmin/dam\\_uploads/vTI/Publikationen/Landbauforschung\\_Sonderhefte/lbf\\_sh361.pdf](http://www.vti.bund.de/fileadmin/dam_uploads/vTI/Publikationen/Landbauforschung_Sonderhefte/lbf_sh361.pdf).
- WI (2006): Nutzungsmöglichkeiten erneuerbarer Energien in NRW - Kurzexpertise im Auftrag des MWME. Wuppertal.
- Wiegmann, K.; Eberle, U.; Fritsche, U. R.; Hünecke, K. (2005): Ernährungswende. Umweltauswirkungen von Ernährung – Stoffstromanalysen und Szenarien. Darmstadt / Hamburg: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Abgerufen von [http://www.ernaehrungswende.de/pdf/DP7\\_Szenarien\\_2005\\_final.pdf](http://www.ernaehrungswende.de/pdf/DP7_Szenarien_2005_final.pdf).
- Wuppertal Institut (2006): Optionen und Potenziale für Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen. Kurzfassung (Endbericht im Auftrag der E.ON AG). Wuppertal. Abgerufen von [http://www.wupperinst.org/uploads/tx\\_wiprojekt/EE\\_EDL\\_Final\\_short\\_de.pdf](http://www.wupperinst.org/uploads/tx_wiprojekt/EE_EDL_Final_short_de.pdf).
- WWF (2009): Modell Deutschland - Klimaschutz bis 2050. Vom Ziel her denken. Basel/Berlin.